



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 الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh 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 minière

**Influence de l'inclinaison du trou de mine sur le  
rendement du tir à l'explosif (simulation par le  
model KUZ-RAM)**

**Cas de la mine de fer à ciel ouvert de Boukhadra- Tébessa**

Présenté et soutenu par

Omar GUETTICHE

Amir YOUSFI

Devant le jury:

	Grade	Etablissement
<b>Président :</b>	Dr Ismail NOUIOUA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
<b>Encadrant :</b>	Dr Leila BOUTERFIF	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
<b>Examineurs :</b>	Dr Saleh SAADAUI	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2022-2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي- تبسة



مقرر رقم : مؤرخ في : 2023/05/29

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،  
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،  
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،  
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،  
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،  
- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.  
- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل للملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم  
- وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في..... ،  
يقرر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيَّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضرة من طرف الطالب (ة):

قطيش عمر، المولود (ة) بتاريخ 1999/05/06 ب تبسة ،

والموسومة ب

Influence de l'inclinaison et du trou de mine sur le rendement du tir à l'explosif (simulation par le model KUZ - RAM) -  
cas de la mine de fer à ciel ouvert de Boukhadra – Tebessa

والمسجل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصفة
1	نويوة اسماعيل	أستاذ محاضر - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	بوطرفيف ليلي	أستاذة مساعدة - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفة
3	سعداوي صالح	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنا

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كل من الطالب المعني والمشرف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملف البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُزّر ب تبسة، في: 2023/05/29

و بتفويض منه

مدير معهد المناجم

المدير العام للمعهد

مدير معهد المناجم

مدير المعهد



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة الشهيد الشيخ التعليم العالي و البحث العلمي  
جامعة العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم: مؤرخ في: 2023/05/30

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،  
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا  
لجامعة العربي التبسي - تبسة،  
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09-08  
المؤرخ في: 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،  
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد  
نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،  
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7  
منه،  
- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.  
- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل للملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل  
ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم  
- وبموجب المقرر رقم ..... المؤرخ في 2023/05/29 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،  
- وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في .....  
يقرر ما يأتي:  
المادة الأولى: يُرخصُ للطالب (ة) قطيش عمر، المولود (ة) بتاريخ 1999/05/06 ب تبسة، بمناقشة مذكرة الماستر  
والموسومة ب

Influence de l'inclinaison et du trou de mine sur le rendement du tir à l'explosif (simulation par le  
model KUZ - RAM) - cas de la mine de fer à ciel ouvert de Boukhadra - Tebessa

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني  
بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمنان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.  
المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة  
العربي التبسي.

حُزّر ب تبسة، في: 2023/05/30

عن المدير، ويتفويض منه

مدير معهد المناجم

جامعة العربي التبسي تبسة  
المدير  
عولمي زويبر  
مدير معهد المناجم



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة الشهيد الشيخ التعليم العالي و البحث العلمي  
جامعة العربي التبسي- تبسة



مقرر رقم: مؤرخ في: 2023/05/30

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09-08 المؤرخ في: 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.

- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل ملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم

- وبموجب المقرر رقم ..... المؤرخ في 2023/05/29 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،

- وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في .....

يقرّ ما يأتي:

المادة الأولى: يُرخصُ للطالب(ة) يوسفى أمير، المولود (ة) بتاريخ 1998/10/22 ب تبسة، بمناقشة مذكرة الماستر

والموسومة بـ

**Influence de l'inclinaison et du trou de mine sur le rendement du tir à l'explosif (simulation par le model KUZ - RAM) - cas de la mine de fer à ciel ouvert de Boukhadra – Tebessa**

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني

بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمن نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملفّ البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة

العربي التبسي.

حُرر ب تبسة، في: 2023/05/30

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم

عولمي زويير  
مدير معهد المناجم



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم : مؤرخ في : 2023/05/29  
يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،  
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،  
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،  
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،  
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،  
- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.  
- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل الملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم  
- وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في..... ،  
يقرر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضّرة من طرف الطالب (ة):

يوسفي أمير، المولود (ة) بتاريخ 1998/10/22 ب تبسة ،

والموسومة ب

Influence de l'inclinaison et du trou de mine sur le rendement du tir à l'explosif (simulation par le model KUZ - RAM) -  
cas de la mine de fer à ciel ouvert de Boukhadra – Tébessa

والمسجّل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصفة
1	نويوة اسماعيل	أستاذ محاضر – أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	بوطرفيف ليلي	أستاذة مساعدة – أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفة
3	سعداوي صالح	أستاذ مساعد – أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنا

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كلّ من الطالب المعني والمشرف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّ ب تبسة، في: 2023/05/29

عن المدير، ويتقويض منه

مدير معهد المناجم

جامعة العربي التبسي  
المعهد المناجم  
مدير المعهد المناجم  
م. زويير

**Dédicace**

*A mon soutien dans la vie après Dieu et Son Messager*

*A ma chère mère Amel*

*A mon cher père, Noureddine*

*A ceux qui ont porté le fardeau de la vie pour moi, je vous aime !*

***A mes frères et sœurs : Mohamed, Sara, et Nabila.***

*À mes chers amis, Chihab, Lokman, Oussama, Amara, et Omar.*

# Dédicaces

الحمد لله الذي بلغنا هذا وما كنا من دونه لبالغون

*Je dédie ce travail :*

**"A mes chers parents Mohamed et Moufida, que dieu les gardes  
et les protèges.**

**"A ma famille notamment.**

**"A mon chère frère Amin.**

**"A mes petites chères sœurs Abrar et Afnèn.**

**"A notre bien-aimé professeur Guedri Laarbi, que Dieu lui  
fasse Miséricorde et lui Pardonne.**

*A tous les amis(es) d'études de ma promotion, et J'aimerais  
exprimer ma gratitude à tous les enseignants pour nous avoir  
traités comme leurs enfants avant les étudiants et je remercie  
également tous les membres de l'Administration de département  
des Mines et Geotechnologie pour leur premier principe, à savoir  
l'étudiant.*

*A tous ceux qui mon aidé de près ou loin pour la réalisation de ce travail.*

## Remerciement

الحمد لله الذي وفقنا لهذا

Au terme de ce travail nous tenons à remercier eu premier lieu Dr Leila Bouterfif, notre encadreur pour son aide précieux, pour ses remarques pertinentes, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

Nous exprimons nos plus profonds remerciements, notre appréciation et notre respect à notre regretté Professeur Guedri Laarbi, en espérant tout pardon et miséricorde pour lui.

Nous remercions également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Un grand merci pour toute l'équipe de "service abattage" au niveau de la mine de Boukhadra, particularité Mr Abid Fathi pour leur accueil et encadrement durant la période du stage pratique.

Nous remercions tous responsables de l'institut des mines et enseignants de département des mines et geotechnologie.

À tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin a mené à terme ce travail.



## Résumé

Notre travail dépend étudier l'influence possible d'un seul des paramètres de plan de tir à leur rendement (fragmentation, économique, sécurité) ce paramètre est l'inclinaison de trou nous utiliserons tout ce que nous avons gagné de la période de stage et en plus d'utiliser toutes les documents justificatives nécessaires pour cela, pour incarner une étude intégrée du travail.

Nous utilisons le modèle de "Kuz-Ram" pour faire une simulation théorique qui inclut toutes les constantes et variables du plan de tir et ses résultats. Pour extraire les résultats les plus précis, et analyser et arriver à un bon résultat de travail.

## Summary

Our work depends on studying the possible influence of only one of the firing plan parameters on their performance (fragmentation, economics, safety) this parameter is the hole inclination. In addition to using all the necessary supporting documents for this, to embody an integrated study of the work.

We use the model of "Kuz-Ram" to make a theoretical simulation which includes all the constants and variables of the firing plan and its results. To extract the most accurate results, and analyze and arrive at a good working result

## ملخص

يعتمد عملنا على دراسة التأثير المحتمل لواحد فقط من معلمات خطة الإطلاق على أداؤها (التجزئة ، الاقتصاد ، الأمان) هذه المعلمة هي ميل الحفرة. بالإضافة إلى استخدام جميع المستندات الداعمة اللازمة لذلك ، لتجسيد دراسة متكاملة من العمل نستخدم نموذج "كوز رام" لعمل محاكاة نظرية تشمل جميع ثوابت ومتغيرات خطة التدوير ونتائجها لاستخراج أدق النتائج وتحليلها والوصول إلى نتيجة عمل جيدة

**Mots clés :** carrière, fragmentation, explosif , plan de tir, hors gabarits ,Kuz-Ram

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Situation géographique de Boukhadra (Kerbati N et al [2019]).....	3
<b>Figure 1.2</b> : Carte géologique régionale (Dubourdiou [1956]).....	5
<b>Figure 1.3</b> : Présentation du djebel Boukhadra, (a) Carte topographique, (b) Carte géologique de djebel Boukhadra.....	6
<b>Figure 1.4</b> : Colonne stratigraphique des monts du Mellègue.....	9
<b>Figure 1.5</b> : Coupe transversale dans l'anticlinal de Boukhadra.....	10
<b>Figure 1.6</b> : Trois coupes transversales dans l'anticlinal de Boukhadra.....	10
<b>Figure 1.7</b> : Vue isométrique du corps minéralisé, Boukhadra (Amec 2011).....	11
<b>Figure 1.8</b> : Morphologie du gisement de Boukhadra.....	12
<b>Figure 1.9</b> : Plan général de Boukhadra (Amec 2011).....	13
<b>Figure 1.10</b> : Vue isométrique de la mine souterraine de Boukhadra (Amec [2011])...	14
<b>Figure 2.1.</b> Propagation de l'onde de détonation.....	21
<b>Figure 2.2.</b> Diagramme de Harries et Mercer.....	24
<b>Figure 2.3.</b> Développement de la fissuration et de la fracturation, (phase 1 à 4).....	26
<b>Figure 3.1</b> : schéma représentatif de l'excès de forage.....	31
<b>Figure 3.2</b> : schéma représentatif de l'inclinaison du trou.....	31
<b>Figure 3.3</b> : schéma représentatif de l'influence de positionnement des trous.....	32
<b>Figure 3.4</b> : schéma représentatif de La déviation de foration.....	33
<b>Figure 3.5</b> : schéma représentatif de l'influence de Hauteur et disposition du bourrage dans les trous.....	33
<b>Figure 3.6</b> : schéma représentatif des paramètres géométriques.....	35
<b>Figure 3.7</b> : schéma représentatif de l'Effet des ondes réfléchies.....	37
<b>Figure 4.1</b> : Comparaison du profil expérimental et calculé du massif fracturé par le logiciel SHALE.....	44
<b>Figure 4.2</b> : Comparaison de la fragmentation mesurée.....	47
<b>Figure 4.3</b> : schéma représentatif des paramètres de foration.....	47

<b>Figure 4.4</b> : Schéma du fonctionnement du logiciel BLASPA.....	54
<b>Figure 5.1</b> : photo représentatif de niveau 1030.....	57
<b>Figure 5.2</b> : photo représentatif de l'espacement entre les fissures.....	58
<b>Figure 5.3</b> : Présentation stéréographique.....	58
<b>Figure 5.4</b> : Schéma de plan de tir.....	59
<b>Figure 5.5</b> : Une boule d'explosif type « Marmanit » de 2.5kg.....	61
<b>Figure 5.6</b> : Sac à deux couches emballé par explosif type « Milanit » de 20kg.....	62
<b>Figure 5.9</b> : Distribution granulométrique des fragments de roche dans le gradin 1030.....	70

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Profondeurs moyennes et angles de pendages du gite exploité en souterrain...	12
<b>Tableau 2.1</b> : résumé les caractéristiques des explosifs fabriqués en Algérie par l'ONEX....	20
<b>Tableau 3.1</b> : Paramètres de tir de mines.....	29
<b>Tableau 5.1</b> : les orientations des familles de discontinuité.....	56
<b>Tableau 5.2</b> : Plan de tir actuel dans la section Ciel Ouvert dans la mine de BOUKHADRA.....	60
<b>Tableau 5.3</b> : paramètres de tir.....	65
<b>Tableau 5.4</b> : Propriétés des roches intactes.....	69
<b>Tableau 5.5</b> : Paramètres des fissures.....	69
<b>Tableau 5.6</b> : Paramètres d'explosif.....	70
<b>Tableau 5.7</b> : Paramètres de tir par la méthode existe et Langfors.....	72

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Géologie de la mine de Boukhadra.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.1. Situation géographique de la mine de Boukhadra.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2 Historique de la mine.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.2 Géologie régionale.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.3 Géologie du site.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.3.1 Stratigraphie.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.4 Travaux de prospection et d'exploitation.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.4.1 Morphologie du gisement.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.4.2 Nature du minerai exploité.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Hydrogéologie.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 L'exploitation du minerai de fer de Boukhadra.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3.1. Exploitation à ciel ouvert.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3.2. Exploitation souterraine.....</b>	<b>14</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>14</b>
<b>Chapitre II</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. L'abattage des roches .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2. L'abattage à l'explosif .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2. Les explosifs .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Les caractéristiques pratiques d'un explosif .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2. Types d'explosifs utilisés dans les carrières .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. Travail de l'explosif.....</b>	<b>20</b>
<b>2.5. Mécanisme de l'explosion.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6. Abattage de la roche .....</b>	<b>23</b>
<b>2.7. Processus technique de tir .....</b>	<b>24</b>
<b>2.8. Mécanismes de la Fragmentation.....</b>	<b>25</b>
<b>2.8.1. Effet général des ondes de choc dans le massif rocheux .....</b>	<b>25</b>
<b>2.8.2. Fragmentation finale et mise en mouvement .....</b>	<b>27</b>
<b>2.8.3. Effet de la présence d'une face libre .....</b>	<b>27</b>
<b>2.8.4. Effet des gaz libérés: fragmentation finale.....</b>	<b>27</b>
<b>2.9. Critères de choix d'explosifs .....</b>	<b>27</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre 3</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>29</b>

<b>3.1. Paramètres contrôlables .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.1. Paramètres lié au trou .....</b>	<b>29</b>
3.1.1.1. Diamètre du trou .....	29
3.1.1.2. Longueur du trou .....	30
3.1.1.2.1. La hauteur du gradin .....	30
3.1.1.2.2. L'excès de forage (sous forage) .....	30
3.1.1.3. Inclinaison des trous .....	31
3.1.1.4. Le positionnement des trous par rapport au front d'abattage.....	32
3.1.1.5. La déviation de foration .....	32
<b>3.1.2. Paramètres liés au bourrage .....</b>	<b>33</b>
3.1.2.1. Hauteur et disposition du bourrage dans les trous.....	33
<b>3.1.3. Paramètres géométriques.....</b>	<b>34</b>
3.1.3.1. Banquette.....	34
3.1.3.2. L'espacement entre les trous successifs.....	34
3.1.3.3. Le rapport de maille.....	34
<b>3.1.4. Paramètres lié à l'énergie d'explosif.....</b>	<b>35</b>
3.1.4.1. Rapport de charge (consommation spécifique).....	36
3.1.4.2. Effet des ondes réfléchies.....	36
3.1.4.3. L'énergie libérée .....	37
<b>3.2. Les paramètres incontrôlables .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.1 .Paramètres liés au massif rocheux (incontrôlable ou difficilement contrôlable).....</b>	<b>38</b>
3.2.1.1. Le massif rocheux .....	38
3.2.1.2. L'influence de la matrice et des hétérogénéités de nature.....	39
3.2.1.3. Indice de tirabilité.....	39
3.2.2. L'hydrologie.....	39
Conclusion.....	40
<b>Chapitre 4</b>	
Introduction.....	42
4.1. Modèles algébriques.....	43
4.2. Modèles de comportement composite.....	44
4.2.1. Le modèle «Bedded Crack» et de code 'SHALE'' .....	44
4.2.2. Modèle NAG-FRAG.....	44
4.3. Modèles empiriques.....	45
4.3.1. Modèle KUZ-RAM.....	45
4.3.2. Modèle de LANGEFORS.....	47
4.3.3. Suivant les caractéristiques de la roche.....	48
4.3.4. Géométrie du tir.....	49
4.3.5. Ajustement des paramètres du tir.....	49
4.3.6. Selon le forage .....	50
4.3.7. Selon le foisonnement (ou le «swelling»).....	50
4.4. Selon la fragmentation des roches.....	51
4.5. Modèles physiques.....	52
4.6. Modèles mécaniques.....	52
4.6.1. Modèle BLASPA.....	53
4.6.2. Modèle FRAG.....	54
4.7. Autres modèles.....	55
<b>Chapitre 5</b>	

<b>Introduction .....</b>	<b>56</b>
<b>5.1. Description de la zone d'étude .....</b>	<b>56</b>
<b>5.2. Analyse des travaux de forage et de tir au niveau de la Mine de Boukhadra..</b>	<b>59</b>
<b>5.2.1.La foration .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2.2. L'abattage .....</b>	<b>59</b>
<b>5.3. Les explosifs utilisés pour le tir .....</b>	<b>61</b>
<b>5.4. Constatations après tir .....</b>	<b>64</b>
<b>5.5. ANALYSE DE LA FRAGMENTATION PAR LE MODEL DE KUZ-RAM..</b>	<b>66</b>
<b>5.5.1. MODELE KUZ-RAM.....</b>	<b>66</b>
<b>5.5.2.Équation de Rosin-Rammler.....</b>	<b>67</b>
<b>5.5.3.Équation de Tidamn.....</b>	<b>67</b>
<b>5.5.4. Principe du fonctionnement du modèle de Kuz-Ram.....</b>	<b>67</b>
<b>5.5.5. Application du modèle de KUZ-RAM.....</b>	<b>68</b>
<b>5.5.6. Données de base de du modèle de KUZ-RAM.....</b>	<b>68</b>
<b>5.5.7. Les dimensions admissibles des blocs .....</b>	<b>68</b>
<b>5.6 Paramètres des fragments ciblés.....</b>	<b>69</b>
<b>5.7. Propriétés des roches intactes.....</b>	<b>70</b>
<b>5.7.1.Interprétation des résultat.....</b>	<b>70</b>
<b>5.8.Calcul des Paramètres de tir en fonction de l'inclinaison du trou par la méthode de Langefors.....</b>	<b>71</b>
<b>5.8.1.Analyse de la fragmentation des paramètres obtenus par la méthode de Langfors par KUZ-RAM.....</b>	<b>72</b>
<b>Résultats et interprétation .....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>74</b>
<b>Conclusion général .....</b>	<b>75</b>

**Annexes**

# Introduction générale



# Introduction générale

---

## Introduction générale

La richesse et la puissance des États ont toujours été associées à l'ampleur des ressources naturelles dont ils disposent. Leur possession de ressources naturelles est suffisante pour accélérer la roue de la modernité en eux, grâce à la bonne exploitation de leur économie forte grâce à ces ressources qui la valeur est estimée à des sommes énormes, qui peuvent atteindre des billions de dollars dans certains pays.

L'Algérie est l'un des pays riches en matière premières. Les bases minières nationales de grande envergure constituent les gisements de fer, de plomb, de baryte, de zinc,...etc. et autres substances suivant lesquelles s'est développée notre industrie lourde.

Cependant, comme toutes entreprises minières, la mine de fer BOUKHADRA (M.F.E) un des plus importantes sociétés implantées sur le territoire algérien, grâce au rôle qu'elle joue dans l'économie régionale et nationale.

Pour cela, il faut mettre en évidence toutes les technologies pour optimiser les problèmes survenus dans le processus d'exploitation tel que : l'instabilité des talus des gradins, les discontinuités du massifs et la qualité de la fragmentation des roches abattues.

Cette dernière, réside toujours comme un problème d'actualité. Elle influe directement sur tous les processus technologiques au niveau des mines, sur la base de dernier problème, nous allons étudier l'effet de l'inclinaison de trou pour le processus d'abattage sur son résultat, et aussi ce travail est proposé comme une contribution à apporter mieux fragmentation au problème des tailles indésirées (hors gabarit) au niveau des chantiers d'exploitation, en s'aidant des outils les plus récents dont doit disposer l'ingénieur des mines.

Nous avons structuré notre travail suivant le plan méthodologique ci-dessous, toutes les données essentielles pour la réalisation de notre projet de fin d'études ont été réunies lors de notre stage.

- Le 1<sup>er</sup> chapitre représente les caractérisations géologiques et présentation de la mine de Boukhadra.
- Le 2<sup>ème</sup> chapitre représente la théorie d'abattage dans les mines à ciel ouvert.
- Le 3<sup>ème</sup> chapitre représente les paramètres influençant sur le tir à l'explosif.

## Introduction générale

---

- Le 4ème chapitre représente les différents modèles de prédiction et de modélisation de tir à l'explosif.
- Le 5ème chapitre représente l'analyse de plan de tir actuel et leur résultat, voire la réelle problématique que nous travaillons sur à base des figures et des chiffres, fait une modélisation de plan de tir actuel utilisé avec KUZ-RAM et nous travaillons sur le changement et l'analyse pour chaque inclinaison et ces résultats utilisons le modèle de KUZ-RAM et présentons les résultats obtenus.

Terminons par une conclusion générale.

# Chapitre

# 01

## Introduction

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont des facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage souterrain et elles ont une grande influence sur le choix des méthodes d'excavation et de soutènement. L'étude de ces conditions nous informe des problèmes potentiels, ce qui nous aidera à proposer des solutions qui permettront d'adapter ou pas le soutènement, le drainage et/ou les traitements spéciaux aux conditions rencontrées. Ces conditions géologiques et hydrogéologiques sont donc des outils très importants pour le géotechnicien pour qu'il obtienne une image aussi complète que possible des caractéristiques du massif rocheux traversé.

### 1.1. Géologie de la mine de Boukhadra

#### 1.1.1. Situation géographique de la mine de Boukhadra

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

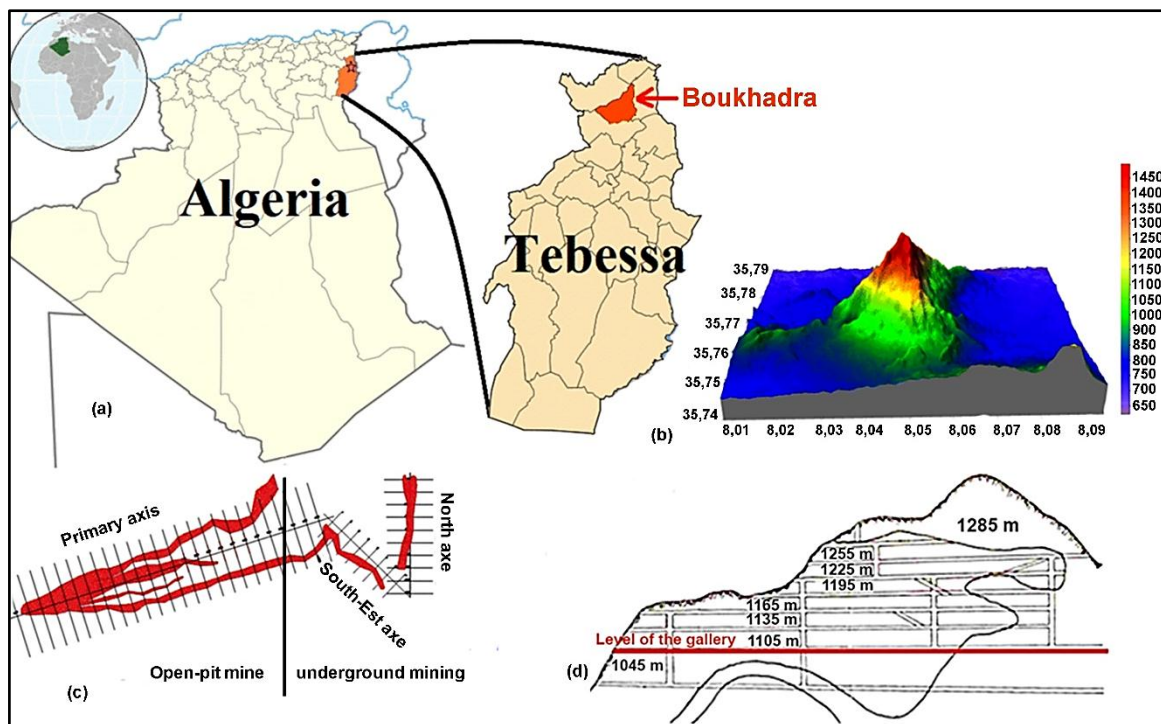


Figure 1.1 : Situation géographique de Boukhadra (Kerbati N et al [2019])

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

Elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe d'EL-Hadjar. Le climat est continental et sec, les températures varient entre 40°C en été et 0°C en hiver, la Pluviométrie est faible avec parfois de faibles chutes de neige.

### **1.1.2 Historique de la mine**

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

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

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

Durant la période de 1967 à 1984, la SONAREM était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères d'Ouenza et Boukhadra.

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

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

Le 01/01/2005 la nomination a été modifiée par mittalsteel Tébessa. Le 18/08/2007 la nomination a été modifiée par Arcelormittal Tébessa.

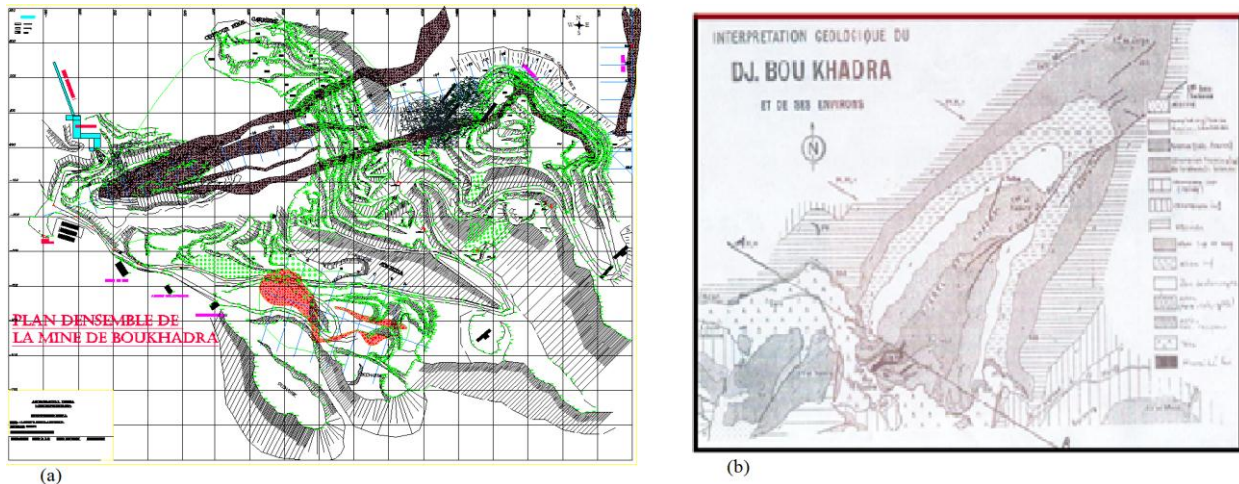
### **1.1.3 Géologie régionale**

Les Monts de Mellègue font partie intégrante de l'Atlas saharien, qui se poursuit en Tunisie par l'Atlas tunisien. Il est composé de trois faisceaux de plis organisés en échelons et



### 1.1.4. Géologie du site

Le massif de Boukhadra présente une structure anticlinale orientée NE-SW, recoupée par le fossé de Tébessa-Morsott d'orientation NW-SE (Figure 4) L'ossature de l'anticlinal est constituée par les terrains du Crétacé moyen (Aptien- Vraconien) qui dessinent dans la partie NE une fermeture périclinale. Les terrains les plus anciens reconnus à l'affleurement sont représentés par les évaporites du Trias, ils sont le plus souvent en contact tectonique avec les formations du Crétacé.



**Figure 1.3 :** Présentation du djebel Boukhadra, (a) Carte topographique, (b) Carte géologique de djebel Boukhadra

#### 1.1.4.1. Stratigraphie

Le gisement de fer de Boukhadra, comme celui de l'Ouenza font partie de la même province métallogénie ferrifère qui s'étend de khenguet - El - Mauhad au sud, Ouenza au Nord et Djerissa à l'Est.

Le djebel Boukhadra ; appartenant au domaine de l'atlas saharien est caractérisé par une structure géologique anticlinale très simple, de direction N.E/S.O, avec une terminaison périclinale au NE. Le cœur de la structure est représenté par des sédiments de l'Aptien.

Du point de vue litho-stratigraphique, la région de Boukhadra est constituée par des sédiments du Mésozoïque tertiaire en partie du quaternaire.

#### Trias

Les dépôts du trias sont développés dans les parties Ouest, Sud et Sud-Est ; ils sont représentés par des marnes bariolées à gypses Dolomies (cargneules) et les débris de calcaires

et de grès. Ces formations sont en contact anormal ou en discordance avec les dépôts du crétacé (Aptien) suite au phénomène de diapirisme. Dans la carrière de Boukhadra (gîte ouest) le trias affleure aux niveaux 890-902 et 914m.

### **Crétacé**

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

### **L'Aptien**

Les dépôts ou les sédiments aptiens de la région Boukhadra occupent des vastes surfaces. L'aptien se présente sous forme de deux faciès bien distincts :

- Faciès carbonaté (calcaire) ;
- Faciès terrigènes (marno-grésocalcaireux).

### **L'Albien**

La base et le sommet de l'albien sont surtout représentés par des marnes, la partie moyenne étant constituée dans une large mesure par des calcaires sublitographiques.

### **Vraconien**

La séquence est composée de minces lits de marnes avec intercalation d'argile marneuse noires et de calcaires marno-argileux. La puissance maximale est de (470 m).

### **Le Cénomaniens**

La s'agit d'une série de marnes grises ou verdâtres grises, avec par endroits des intercalations de calcaires.

### **Turonien**

Les dépôts de cet âge s'observent dans la partie Ouest et Sud du domaine traité. Il s'agit surtout de calcaires épais et massif pélitique marneux dans la partie basale, avec de rares minces intercalations de marnes. La puissance est variable, décimétrique jusqu'aux quelques centaines de mètres.



### **Coniacien**

Contient les marnes argileuses avec intercalation d'argile marneuse et par endroit de calcaire marneux.

### **Tertiaire**

Les roches du tertiaire sont représentées par des conglomérats à éléments variés, à ciment carbonaté et des intercalations de roches gréseuses. Ces roches affleurent uniquement dans la partie occidentale.

### **Quaternaire**

Les dépôts du quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, blocs de calcaires, grés débris de minerai et les conglomérats, ils sont répandus sur les flancs de la montagne et les parties basses du relief.

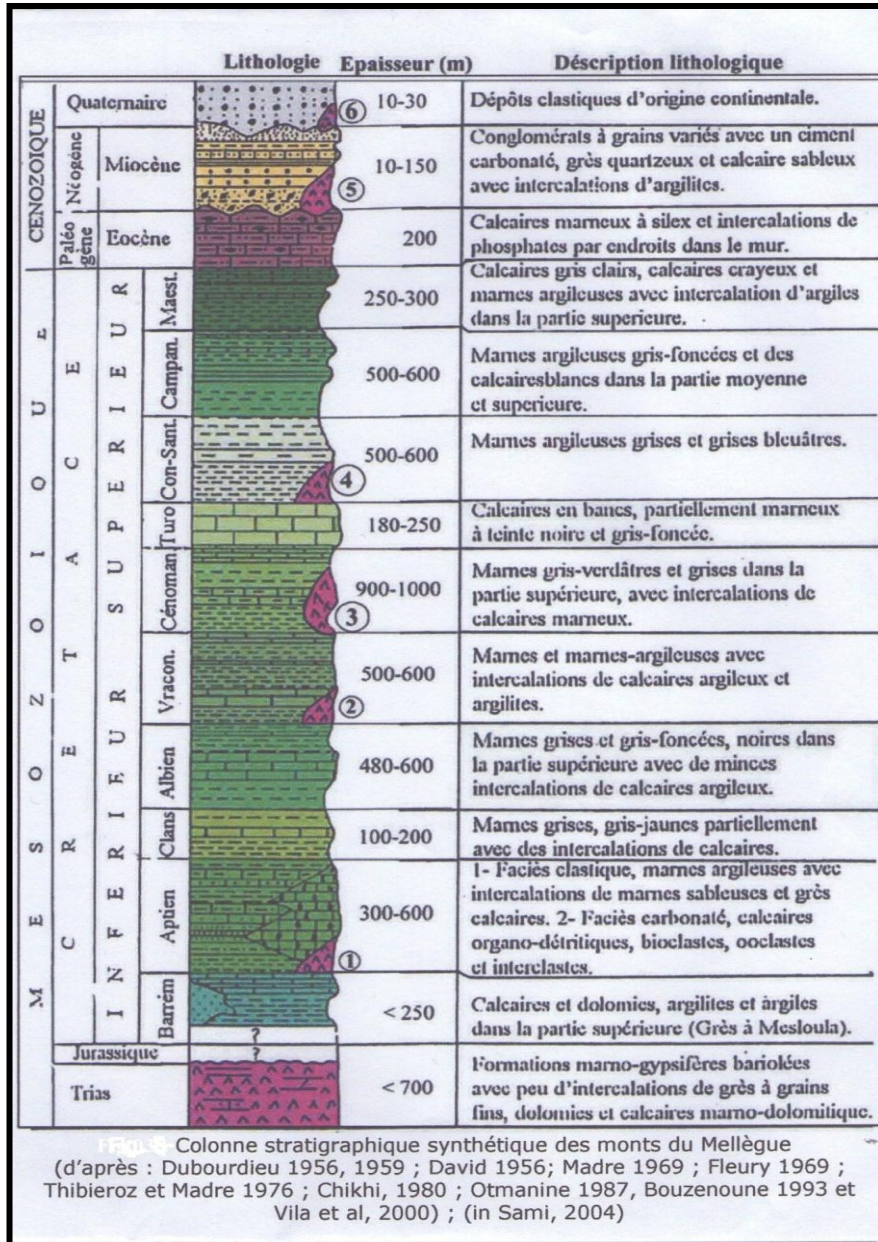


Figure 1.4 : Colonne stratigraphique des monts du Mellègue

- **Tectonique**

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

L'anticlinal de Boukhadra est affecté principalement par la faille de Koudiet -El – Hamra qui est le relais de la faille de Boukhadra de direction NE/SO.

Dans la partie Sud- Ouest (à l'aval du pic), la structure est affectée par un effondrement Considérable. D'autres failles sans importance majeure, à petits rejets sont signalées également aux environs immédiats du gisement.

Par ailleurs, nous citons le phénomène de diapirisme qui a joué un rôle prépondérant dans la formation de la structure et les manifestations minérales de Boukhadra (Genèse de la minéralisation).

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

La 1ère se prolonge presque parallèlement à l'axe de l'anticlinal à partir du pic vers la terminaison périclinale.

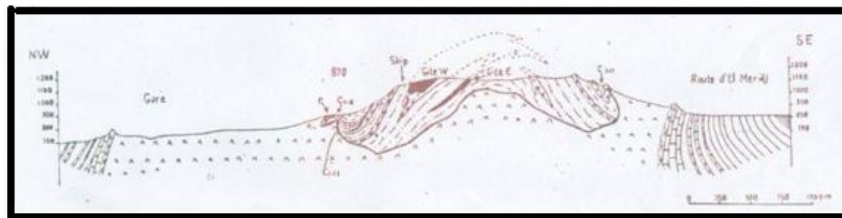


Figure 1.5 : Coupe transversale dans l'anticlinal de Boukhadra

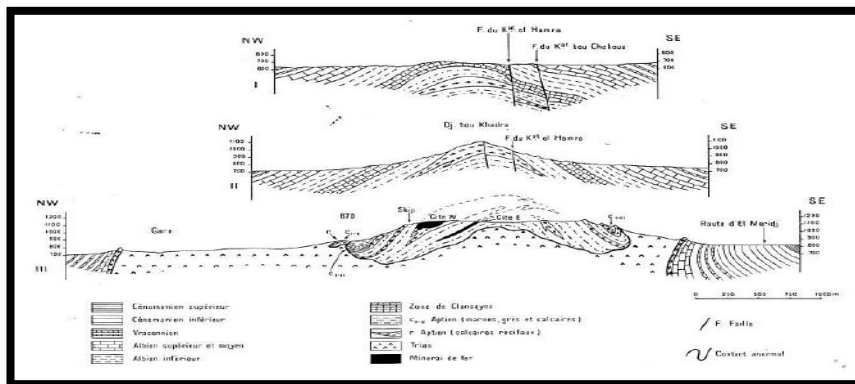


Figure 1.6 : Trois coupes transversales dans l'anticlinal de Boukhadra.

La 2ème zone de dislocation tectonique de direction WNW-ESE coupe la structure dans sa partie centrale en deux parts, l'amplitude de cette dislocation peut arriver jusqu'à 1000 mètres.

D'autres failles, sans importance majeure sont à signaler.

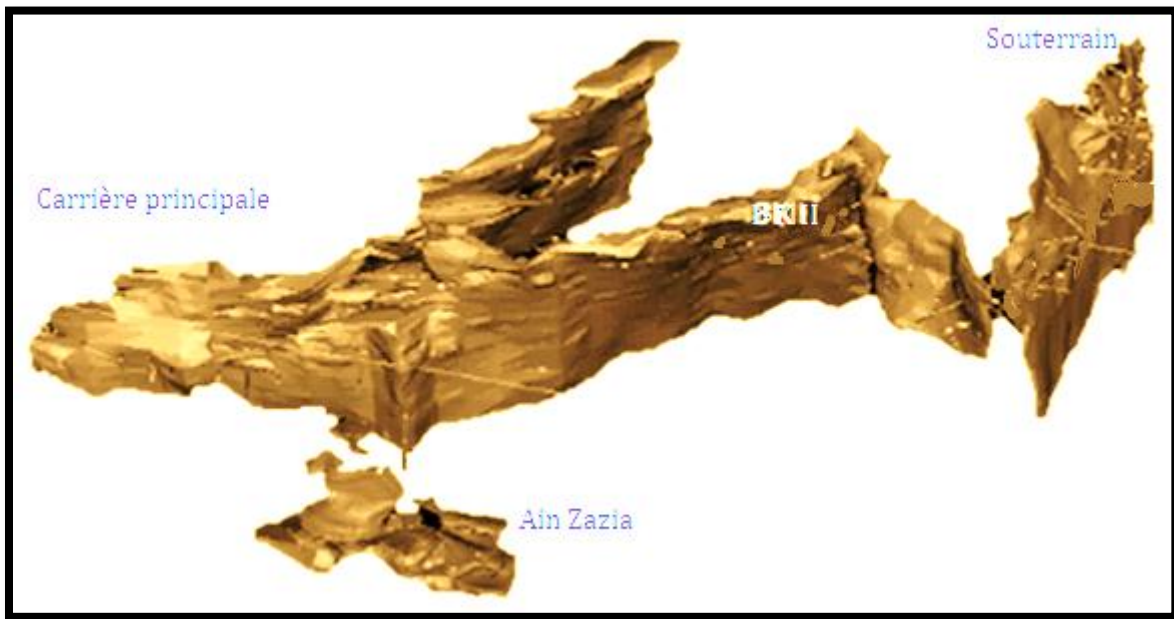
### 1.1.5. Travaux de prospection et d'exploitation

La prospection géologique a été effectuée principalement par des travaux miniers et des sondages de profondeur moyenne, suivant les niveaux (845 à 1225 m). Elle est concentrée sur

les parties supérieures (amont) des corps minéralisés, excepté la zone de la carrière principale où la prospection est allée jusqu'au niveau 845 m.

Sur les axes, principal et Sud-est, les travaux de recherche sont arrêtés au niveau 1045 m et sur l'axe Nord au niveau 1105 m.

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



**Figure 1.7 :** Vue isométrique du corps minéralisé, Boukhadra (Amec 2011)

La minéralisation est de type hématite–limonite résultant de l'oxydation de la sidérite. La texture du minerai est finement poreuse ou concrétionnée géodique. Comparativement aux gisements d'Ouenza, le minerai de Boukhadra est d'une qualité supérieure, riche en Fer ( $Fe_{moy}$  sup à 50 %).

### 1.1.5.1. Morphologie du gisement

Le gisement de minerai de Fer est de forme lenticulaire de type hydrothermale sédimentaire d'une longueur de 900 à 2200 m et d'une puissance variante de 10 à 50 m ; la minéralisation est de type fer hématite de formule chimique ( $F_2O_3$ ) ; sa teneur moyenne est supérieure à 50% ;

Globalement le gisement de Boukhadra est composé de quatre (04) corps minéralisés principaux et les petites veines de moindre importance:

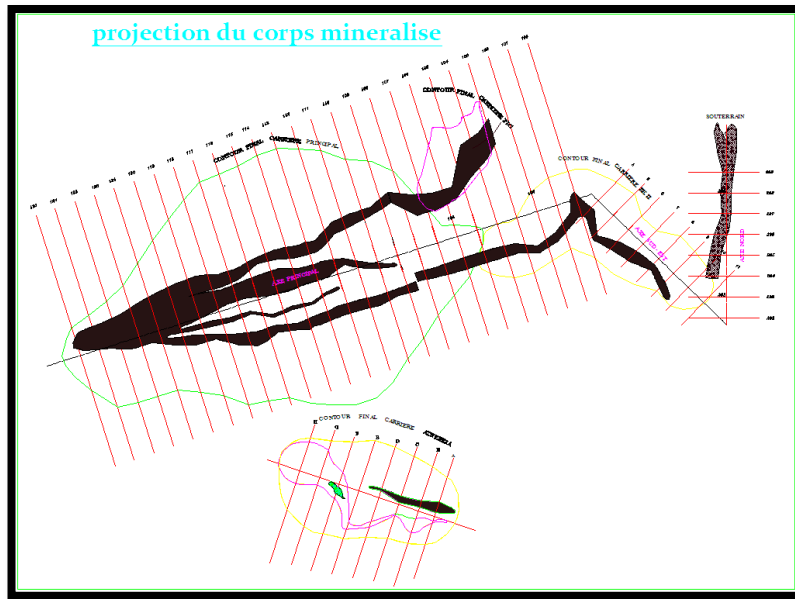


Figure 1.8 : Morphologie du gisement de Boukhadra.

Selon la première estimation des réserves réalisées en 1981 par la D.E.D basée sur les résultats de prospection, les réserves géologiques globales sont évaluées à 50 millions de Tonnes en catégories B,C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>.

### 1.1.5.2. Nature du minerai exploité

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54 % de fer. Le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire, d'une longueur de 900 à 2200 m et d'une puissance variant de 10 à 15 m. le tableau 5.1 donne les profondeurs moyennes et angle de pendage du gite exploité en souterrain :

Tableau 1.1 : Profondeurs moyennes et angles de pendages du gite exploité en souterrain

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

## 1.2. Hydrogéologie

D'après les études hydrogéologiques il n'y a aucune nappe aquifère en eau potable dans la région minière de Boukhadra mais il existe une nappe aquifère d'eau non potable qui est caractérisée par un niveau hydrostatique égale à 818 m.

Dans le niveau amont 926 m, un mince filet d'eau apparaît entre les marnes. Cette eau est récupérée par une citerne pour l'arrosage de la piste ainsi dans les forages le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible, à l'exception des multiples petits chéneaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsème de Djebel Boukhadra.

Pour une description hydrologique de la région de Boukhadra, on ne peut pas parler d'oueds, ou de réseau hydrographique proprement dit, mais on remarque des talwegs sec pendant une longue période de l'année et à faible écoulement. Leurs captages pratiquement impossibles à cause de la topographie et leurs faibles quantités.

### 1.3. L'exploitation du minerai de fer de Boukhadra

Le minerai est exploité par deux méthodes d'exploitation :

- Exploitation à ciel ouvert ;
- Exploitation souterraine.

Le gisement de Boukhadra est exploité en souterrain par la méthode sous niveau abattu en garantissant l'ouverture à l'aide des galeries au jour, et celle à ciel ouvert (carrière) par la méthode des demi tranchées.

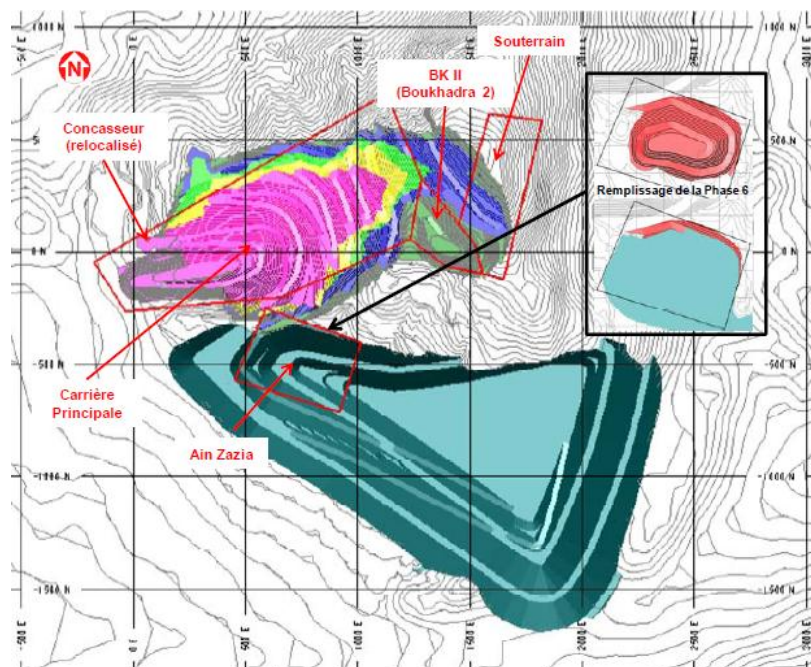


Figure 1.9 : Plan général de Boukhadra (Amec 2011)

### 1.3.1. Exploitation à ciel ouvert

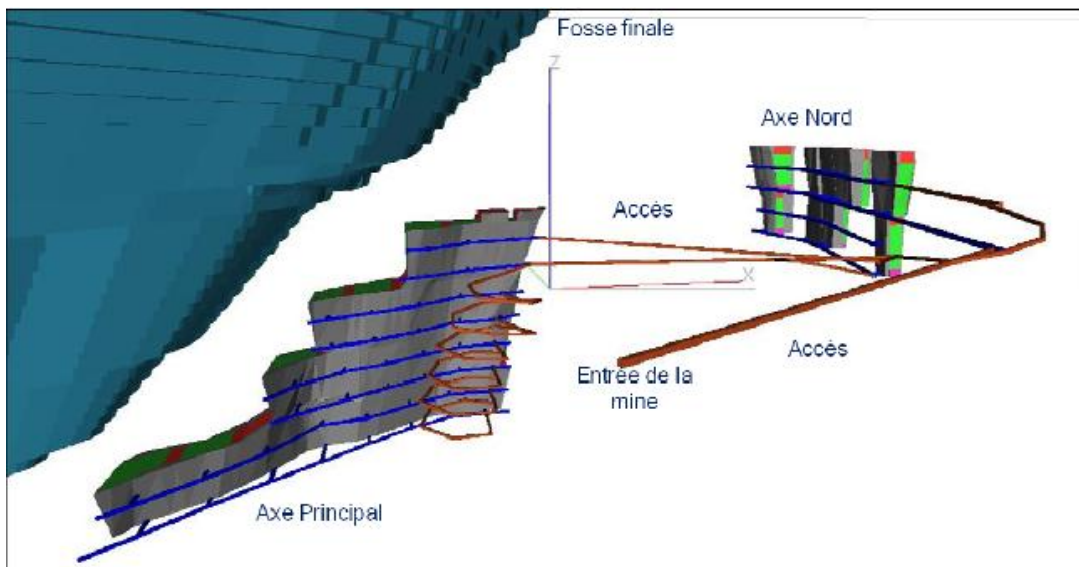
L'exploitation de la carrière de Boukhadra comprend quatre quartiers d'exploitation : la carrière principale, ain zazia, pic (épuisé) et BKII (épuisé).

Parmi ces quatre quartiers, la carrière principale est le seul quartier en phase de production.

Le quartier d'ain zazia connaît un arrêt à cause des travaux de développement.

### 1.3.2. Exploitation souterraine

L'exploitation souterraine comprend trois quartiers d'exploitation (trois axes) : axe nord, axe sud-est, axe principal.



**Figure 1.10** : Vue isométrique de la mine souterraine de Boukhadra (Amec [2011])

Cette méthode connaît plusieurs types d'ouvrages souterrains verticaux (cheminées), inclinés (montages, descenderies), horizontaux (galeries).

L'ouverture du gîte au niveau (1105 m) s'effectue par galerie au jour, vu le relief de la région est montagneux et très accidenté à certains endroits.

## 1.4. Conclusion

Les reconnaissances et études géologiques doivent donner au concepteur d'un ouvrage souterrain les éléments suivants :

- Géologie régionale, histoire géologique et tectonique du massif ;
- Structure du massif ;
- Inventaire. et localisation des accidents (failles, zones fracturées, zones broyées, .. ) ;

- Description des terrains rencontrés selon leur nature pétrographique et minéralogique, selon leurs qualités, selon leurs discontinuités.

Les études géologiques réalisés dans la région considèrent les formations triasiques comme des diapirs polyphasés liés aux phases compressives depuis l'Aptien jusqu'au Quaternaire.

Les dépôts de marnes bariolées, gypses, dolomies, débris de calcaires et de grès sont liés au trias.

La série Aptienne qui porte la minéralisation est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le gîte sud.

La région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques : Tectonique plissante et tectonique cassante. Ces deux phases tectoniques ont causé plusieurs failles et fissures qui créent d'énormes difficultés pour l'exploitation souterraine qui est situé dans une zone tectonique de broyage.

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

Le minerai de Boukhadra est exploité à ciel ouvert et en souterrain ; le chapitre suivant fera l'objet d'une étude détaillée sur ces méthodes d'exploitations.

La description géologique des terrains est considérée comme un support assez fort pour un diagnostic de la géologie et par la suite la détermination du comportement des massifs rocheux, une bonne analyse géotechnique doit être basée sur une bonne analyse géologique, la perfection de ces dernières peut nous donner une meilleure description du comportement des massifs rocheux.

Nous avons présenté dans ce chapitre une description géologique du massif rocheux de Boukhadra en présentant les différentes formations géologiques de la région et le prolongement du gisement au cours du massif avec une présentation du processus d'exploitation en bref.



# Chapitre

# 02

### Introduction

L'abattage des roches représente la première phase des processus technologiques d'exploitation des gisements à ciel ouvert. Il consiste à modifier l'état naturel des roches dans le but de minimiser la blocométrie et par conséquent une facilité au niveau des travaux d'extraction.

L'abattage à l'explosif est l'un des processus de base de l'exploitation minière et l'industrie des carrières, un tir parfait exige un bon choix du type d'explosif, une quantité d'explosif bien calculée avec une planification du mécanisme de tir favorable afin d'extraire une quantité de roches bien fragmentées en conservant le processus d'abattage dans des conditions de sécurité désirées.

#### 2.1. L'abattage des roches

L'abattage des roches est l'un des principaux procédés de la chaîne technologique minière. Il consiste à la destruction des roches au niveau du massif et leur obtention sous-forme de morceaux abattus de grosseurs et de volumes différents.

En pratique minière, il existe un certain nombre de méthodes d'abattage à savoir :

- ❖ L'abattage mécanisé ;
- ❖ L'abattage par fil diamanté ;
- ❖ L'abattage à l'explosif. etc...

Dans la carrière de boukhadra , l'abattage se fait par l'explosif parce que le calcaire qui forme le gisement est caractérisé par une dureté  $f = 7$ .

L'utilisation de la méthode d'abattage à l'explosif ne donne jamais un taux de blocs hors gabarit égal à 0 % quel que soit le réglage de la qualité de la fragmentation des roches, à cause de la fissuration du massif et la dissipation élevée de l'énergie du tir dans l'atmosphère .

##### 2.1.1. L'abattage à l'explosif

C'est la méthode la plus usitée. L'abattage en masse de blocs à l'explosif concerne essentiellement les roches dures, elle se fait dans des gradins prédécoupés par des forages, sur 10 mètres de paroi au maximum. Dans les forages, on place les explosifs caractérisés par une forte puissance ; l'explosion interne développe une pression de gaz pouvant dépasser quelques centaines de milliers de bars.

C'est un procédé très important, il consiste non seulement à choisir le type d'explosif en fonction des contraintes du milieu mais aussi à déterminer la quantité nécessaire dans le trou, sa répartition et son initiation.

### 2.1.2. Les explosifs

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 électrique 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 :

- Combustion simple ;
- Déflagration ;
- 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 7000 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

### 2.2. Les caractéristiques pratiques d'un explosif

La caractérisation en laboratoire des explosifs industriels est indispensable au développement et à l'agrément de formules nouvelles. Cependant, la plupart des mesures effectuées sur les explosifs présentent un caractère strictement comparatif, les conditions expérimentales étant assez éloignées des conditions réelles d'utilisation .

Les principales caractéristiques des explosifs industriels sont les suivantes :

#### **A) La densité :**

C'est une caractéristique importante qui peut remettre en cause la réussite d'un travail à l'explosif, elle est exprimée en  $\text{gr/cm}^3$ . Avec un explosif de haute densité, l'énergie développée sera concentrée, ceci est conseillé dans des travaux de décrochage, de forage et d'abattage dans les sols résistants et rigides. Pour un explosif de faible densité, le travail de fragmentation et de fissuration sera fait avec une grande répartition de l'énergie, ceci est conseillé pour des sols friables et pour des roches tendres.

#### **B) Le diamètre critique de détonation :**

C'est, par définition, le plus petit diamètre d'une charge explosive au-dessous duquel la détonation est impossible à l'air libre, car l'onde explosive ne peut s'y entretenir. Bien que l'utilisation dans un trou de mine puisse, du fait du confinement, abaisser la valeur du diamètre critique de détonation de l'explosif, il est évidemment souhaitable que le diamètre du trou soit supérieur au diamètre critique de détonation mesuré à l'air libre.

#### **C) La sensibilité à l'amorce :**

Toute onde de choc n'est pas capable d'amorcer la détonation de l'explosif considéré. Il existe une pression minimale pour cet amorçage.

Dans la pratique, on distingue :

- ❖ Les explosifs «sensibles au détonateur» (c'est le cas de la plupart des explosifs industriels encartouchés) ;
- ❖ Les explosifs qui, pour leur amorçage, nécessitent soit un cordeau détonant, soit un «bousteur».

#### **D) La vitesse de détonation :**

Il s'agit de la vitesse de propagation de l'onde de choc dans le matériau explosif. Elle conditionne le pouvoir brisant de l'explosif et de l'état de fracturation à attendre du tir. La

vitesse de détonation est fortement influencée par les conditions du tir. Elle croit notamment avec le confinement et le diamètre de la charge jusqu'à un optimum [3].

### ***E) L'énergie :***

Par définition, l'énergie d'un explosif correspond à la quantité de chaleur qu'il dégage à volume constant. Il s'agit de l'énergie totale disponible qui serait libérée dans un cas idéal. Au cours d'un tir, l'énergie explosive réellement utilisée ne représente qu'une faible part de l'énergie chimique théorique.

Une grande partie de l'énergie disponible est perdue dans le trou de mine sous forme d'onde sismique (vibration), d'onde aérienne (bruit) et de chaleur.

En pratique, on aura plutôt recours aux énergies de choc et de gaz qui sont respectivement fonctions de l'amplitude de l'onde de choc transmise dans le milieu connexe et du volume de gaz produits sous pression.

### ***F) L'aptitude à transmettre la détonation :***

Au cours du remplissage d'un trou de mine avec un explosif encartouché, il se peut que la charge soit interrompue par un intervalle d'air, de fragments de roches ou de forage. De ce fait, afin de limiter le risque de ratés, on impose que l'explosif ait une certaine aptitude à transmettre la détonation entre cartouches non jointives.

Cette aptitude est caractérisée par le « coefficient de self excitation » de l'explosif considéré, qui est défini comme la distance (exprimée en cm) à laquelle la détonation d'une des cartouches se transmet à la seconde avec une probabilité de 50 % .

### ***G) La sensibilité aux chocs, à la friction, à la chaleur et à l'humidité :***

Ces dernières caractéristiques sont celles qui vont imposer les conditions de mise en œuvre et de stockage de l'explosif .

## **2.3. 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% .

**Tableau 2.1:** résume les caractéristiques des explosifs fabriqués en Algérie par l'ONEX.

<b>Désignations</b>	<b>Densité g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Vitesse de Détonation m/s</b>	<b>Résistance à l'eau</b>	<b>Domaine d'utilisation</b>
<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

#### **2.4. 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.

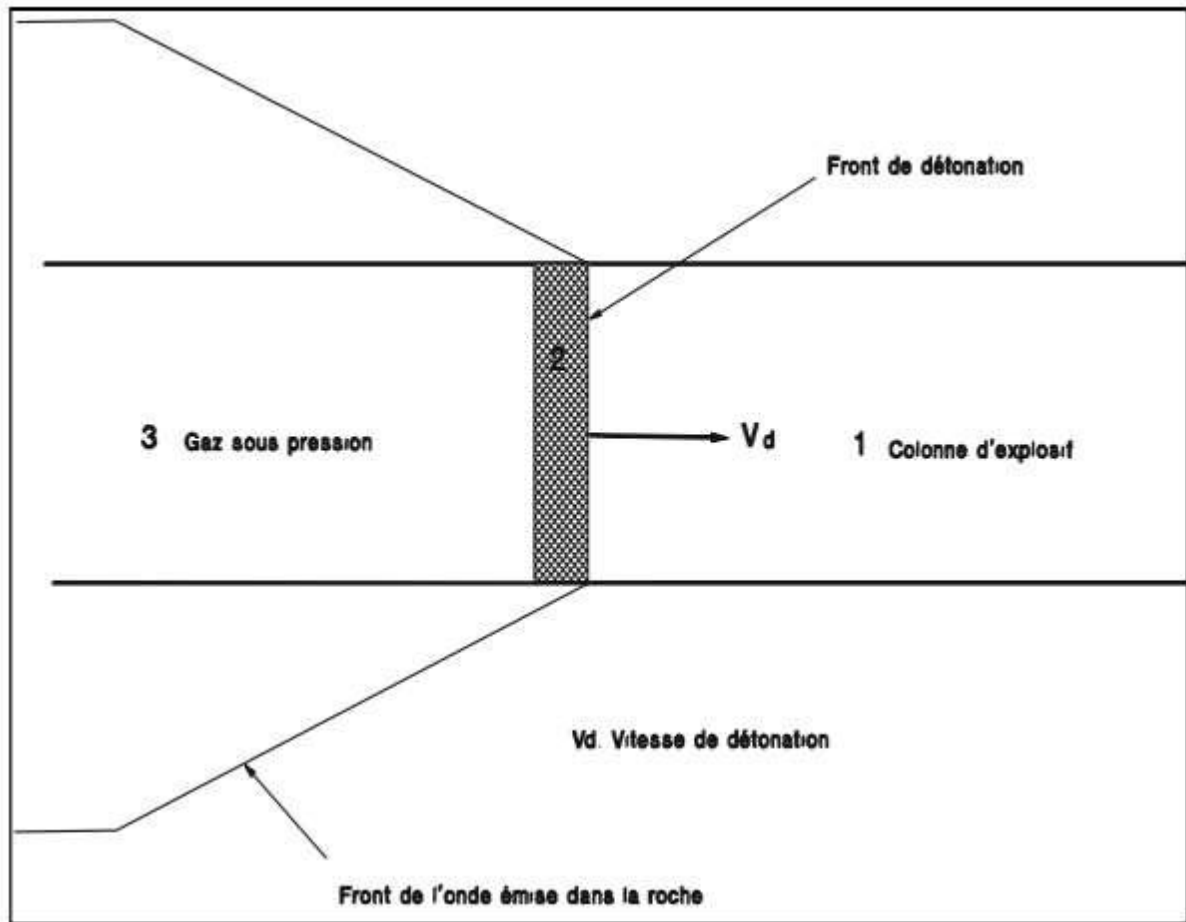


Figure I.1. Propagation de l'onde de détonation.

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 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.

## 2.5. 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  $\text{CO}_2$ , de l' $\text{H}_2\text{O}$  et des  $\text{NO}_x$ , libérés à des températures allant de  $1000^\circ\text{C}$  à  $4000^\circ\text{C}$  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.

### 2.6. 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.

*1- 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.

### 2.7. 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 cote fournir de grandes quantités de roche bien fragmentée pour le processus de traitement et de l'autre cote 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 ont établis 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).

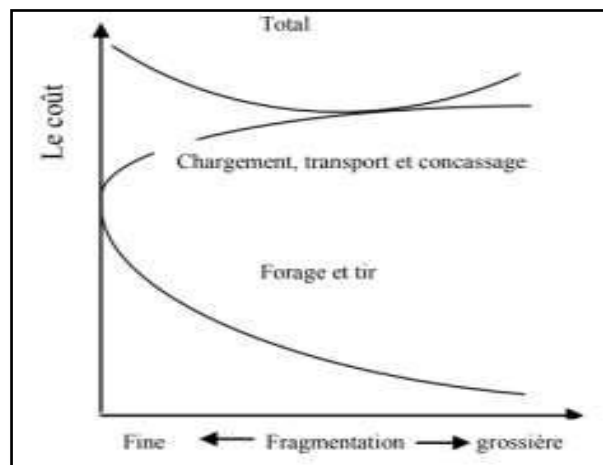


Figure I.2. Diagramme de Harries et Mercer.

### 2.8. Mécanismes de la Fragmentation

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

#### 2.8.1. 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.

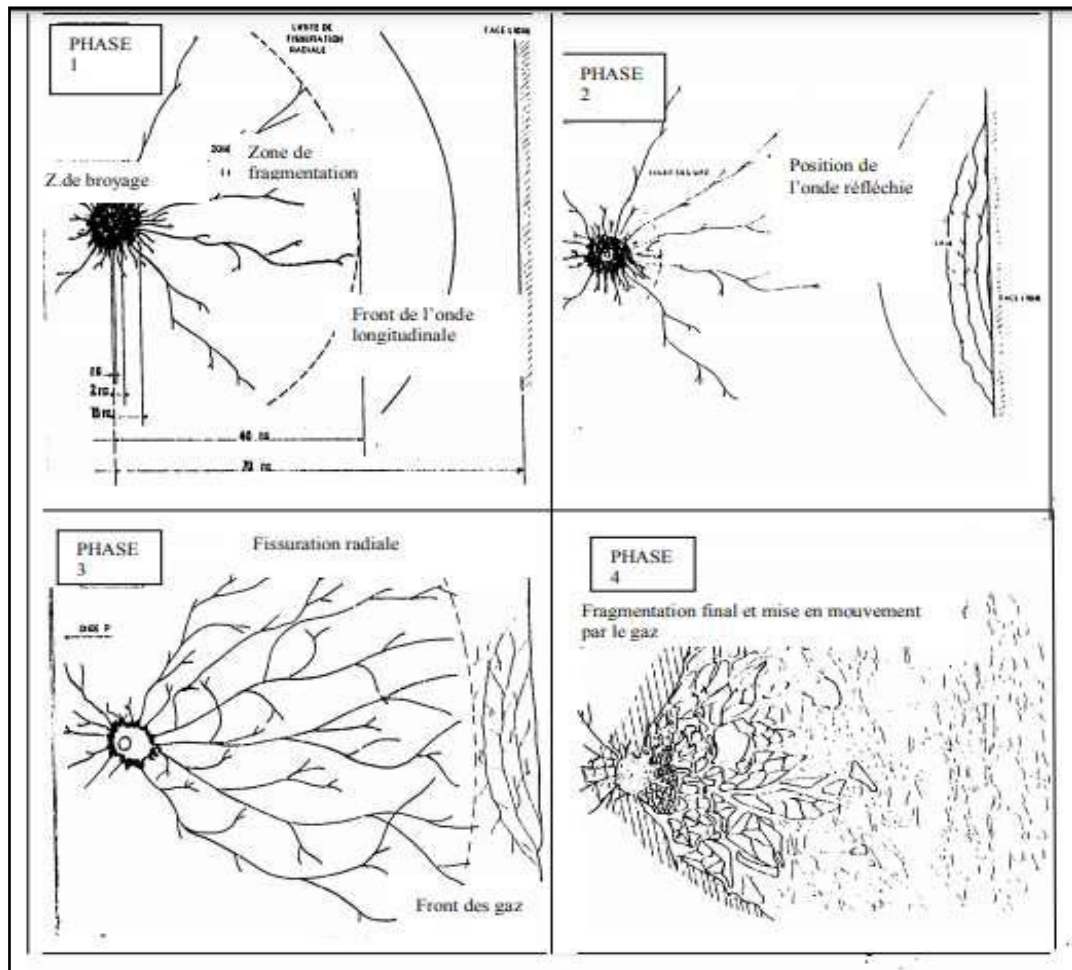
##### a) Zone de broyage :

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.

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.

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

### b) Zone de fissuration radiale :

Dans cette zone (figure I.3 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., 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.

### c) Zone sismique

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

### 2.8.2. 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.

### 2.8.3. 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. 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 I.3 phase 2 et 3).

### 2.8.4.. 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.

Jaeger et Cook (1979) prétendent que les gaz libérés 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.

## 2.9. Critères de choix d'explosifs

Le choix de l'explosif se définit par le travail qui lui est demandé (par exemple : abattage, décrochage, fissuration etc.). Généralement, l'explosif est choisi essentiellement en fonction de deux critères :

### A) Par rapport au massif rocheux :

L'humidité détermine une première sélection forcément respectée ; un explosif résistant à l'eau est choisi dans une roche humide. Mais de plus, l'explosif doit être « adapté » à la roche, ce choix peut se faire par l'examen du rapport d'impédance ou plus simplement par le choix d'un explosif de vitesse de détonation élevée dans une roche résistante. Si le massif est facturé, on privilégie un explosif qui exerce surtout un effet de poussée (quantifiée par son énergie des gaz et par son volume des gaz) [4].

### **B) Par rapport à la productivité de l'entreprise :**

Ce critère est souvent pris en considération par plusieurs entreprises. Des grandes carrières travaillent avec des sondeuses à fort diamètre pour garantir une cadence de production élevée. Ce qui implique de choisir des cartouches d'explosif à grand diamètre [4].

### **Conclusion :**

L'abattage à l'explosif dans l'exploitation minière est une technique fondamentale pour fragmenter les roches et faciliter l'extraction des minéraux. La réussite de cette opération dépend de plusieurs paramètres clés, tels que la conception de la charge explosive, la géologie du site, la séquence de tir et les conditions environnementales. En comprenant et en maîtrisant ces paramètres, il est possible d'optimiser l'efficacité de l'abattage à l'explosif, tout en garantissant la sécurité des travailleurs et en minimisant les impacts sur l'environnement. Une planification délicate et une expertise technique sont donc essentielles pour assurer le succès de cette méthode d'extraction minière.

# Chapitre

# 03

## Introduction

Lorsqu'il s'agit de réaliser des tirs à l'explosif, la planification minutieuse et la prise en compte de divers paramètres sont essentielles pour atteindre les résultats souhaités. Le plan de tir à l'explosif joue un rôle crucial dans la réussite de cette opération, en définissant les étapes clés, les techniques et les paramètres qui influenceront directement les résultats obtenus. Ce plan détaillé prend en compte une multitude de facteurs tel que les paramètres Mentionnés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.1:** Paramètres de tirs 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 de la surprofondeur.</li> <li>- Angle d'inclinaison du trou.</li> <li>- Paramètres liés au bourrage.</li> <li>- Hauteur du talus.</li> <li>- Géométrie de la maille.</li> <li>- Rapport espacement/banquette (rapport de maille).</li> <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 du massif en place</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Géologie.</li> <li>➤ propriétés physico-mécaniques du matériau.</li> <li>➤ Structure géométrique du massif rocheux.</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> eau (quelquefois maîtrisable)</p>
	<p><b>Autres</b> Temps</p>

### 3.1. Paramètres contrôlables

#### 3.1.1. Paramètres lié au trou

##### 3.1.1.1. Diamètre du trou

Le diamètre du trou de fourrage est généralement déterminé en fonction de l'équipement disponible. De manière réciproque, une fois que le diamètre du trou est fixé, on choisit un équipement approprié pour le réaliser.

En pratique, plus le diamètre du trou est important, plus la hauteur du gradin, sera élevée. Cette relation entre la hauteur du gradin et le diamètre du trou dépend plutôt du volume de roche à abattre



que d'un calcul mathématique précis. La séquence des travaux d'abattage de la roche est généralement déterminée par l'équipement de chargement disponible. Une fois que cet équipement est connu, le diamètre du trou peut être déterminé. Il existe une formule pratique qui repose sur le diamètre du trou au volume de la benne du chargeur.

$$Vg \text{ (m}^3\text{)} = \Phi \text{ (cm)}$$

Volume du godet (m<sup>3</sup>) = diamètre du trou (cm) (abatage des roches et vibration)

### **3.1.1.2. Longueur du trou**

Elle dépend principalement de la hauteur du gradin, qui est un paramètre clé dans les opérations d'exploitation à ciel ouvert. La longueur des trous de forage est également influencée par l'inclinaison des trous et la longueur de sous forage.

#### **3.1.1.2.1. La hauteur du gradin**

Le gradin est considéré comme la méthode la plus rationnelle pour abattre la roche, impliquant l'exécution d'un gradin approprié. Cependant, plusieurs facteurs entrent en jeu dans la détermination de la hauteur du gradin :

- ❖ Stabilité des roches ;
- ❖ Caractéristiques des excavateurs employés ;
- ❖ Règles de sécurité ;
- ❖ Dureté de la roche ;
- ❖ Production annuelle.

#### **3.1.1.2.2. L'excès de forage (sous forage)**

Il est nécessaire de prévoir un excès de forage pour fragmenter la roche au pied du gradin et permettre aux engins de chargement de suivre le niveau requis. Une fragmentation de qualité médiocre à ce niveau peut engendrer des coûts d'exploitation très élevés. En revanche, une fragmentation excessive peut endommager la partie inférieure du talus et réduire la stabilité globale de la structure. L'excès de forage doit donc être proportionnel à la banquette et avoisiner 0,3 fois sa taille. Toutefois, ce paramètre devient nul ou insignifiant si le massif présente des discontinuités horizontales prédominantes.

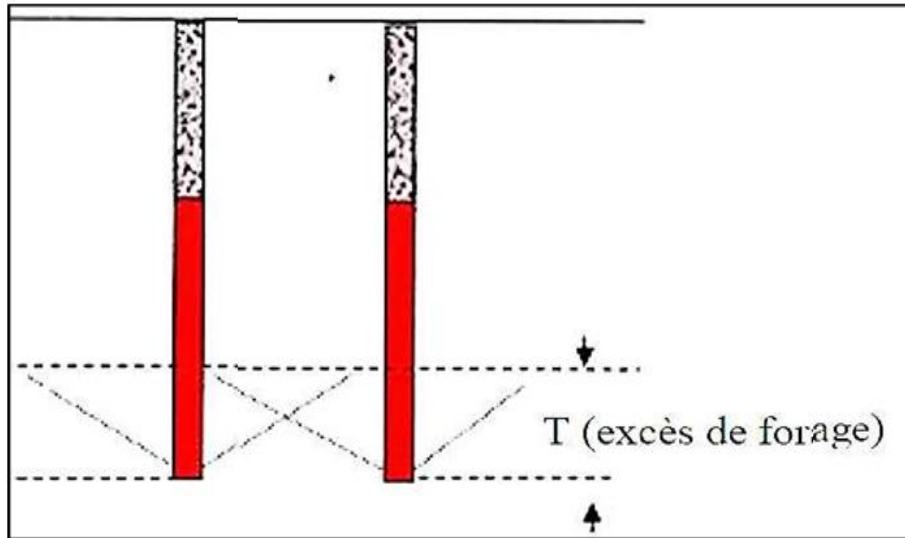


Figure 3.1:Schéma représentatif de l'excès de forage (Berdoudi.S 2021)

### 3.1.1.3. Inclinaison des trous

L'utilisation de trous inclinés est bénéfique pour améliorer l'efficacité de la fragmentation des roches. Cette méthode permet de réduire la zone de fragmentation réglée, de diminuer les pertes d'énergie de charge dans le massif et de réduire l'énergie nécessaire pour détruire le pied du gradin.

Les résultats de pratiques d'abattage ont montré que l'utilisation de trous inclinés permet de réduire la production de blocs hors gabarit de 8 à 10% à 15 à 25% tout en augmentant le rendement des pelles mécaniques de 1,5 fois.

En conclusion, l'utilisation de trous inclinés s'avère être une méthode efficace pour améliorer la fragmentation des roches, tout en réduisant les pertes d'énergie et en améliorant le rendement des pelles mécaniques.

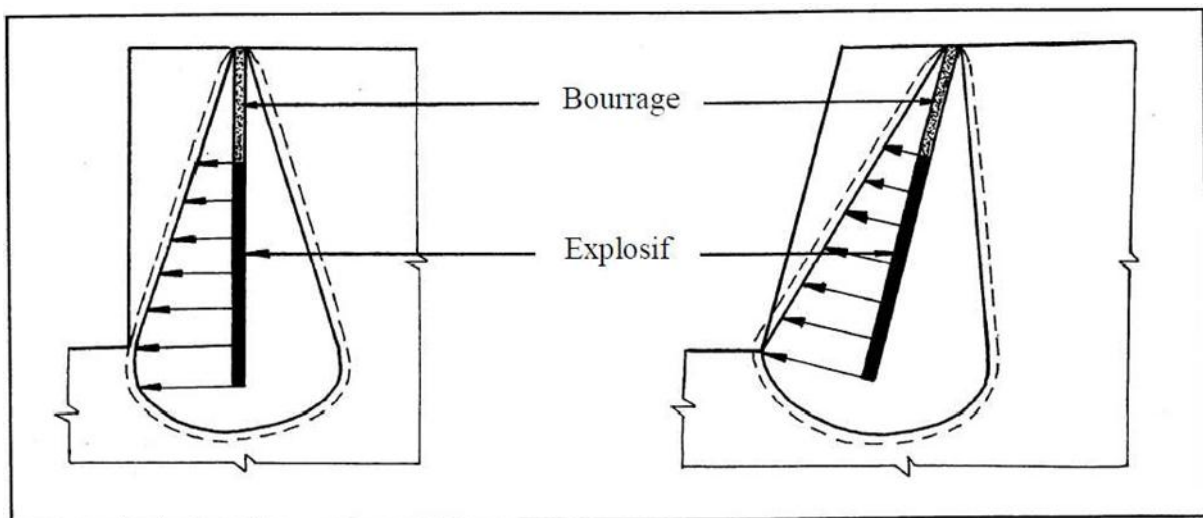
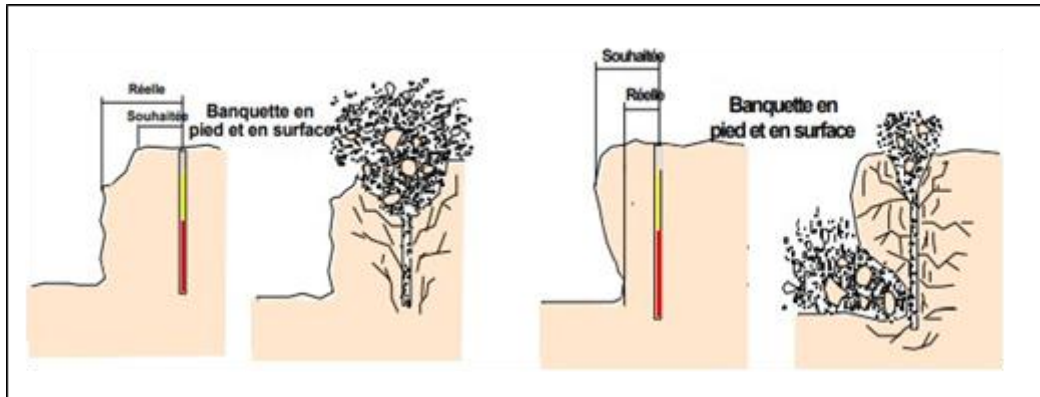


Figure 3.2: Schéma représentatif de l'inclinaison de trou

### 3.1.1.4. Le positionnement des trous par rapport au front d'abattage

Il est essentiel d'établir un profil précis du front de taille lorsque celui-ci présente des irrégularités importantes, telles que celles illustrées ci-dessous. Une mesure approximative par rapport au sommet apparent du gradin peut conduire à une surestimation de la banquette dans le cas de gauche, ou à une sous-estimation dans le cas de droite. Cela peut entraîner des projections verticales importantes dans le premier cas, ou horizontales dans le second



**Figure 3.3 :** Schéma représentatif de l'influence de positionnement des trous par rapport au front d'abattage)

### 3.1.1.5. La déviation de foration

Il est largement admis que la présence de structures, d'hétérogénéités ou de vides dans le massif peut causer des déviations en foration. La machine utilisée pour la foration ainsi que l'orientation du pendage ont également un impact sur ces déviations. Les déviations en foration ne devraient pas dépasser 3% (soit 30 cm pour une distance de 10 m). Cependant, sur les chantiers, il n'est pas rare de constater des déviations bien au-delà de ces valeurs. Une déviation de foration dans un plan perpendiculaire au front de taille peut entraîner une surévaluation ou une sous-évaluation de la banquette d'abattage, tout comme un défaut d'implantation. En revanche, si la déviation a lieu dans un plan parallèle au front de taille, deux charges de pied risquent de se rapprocher dangereusement, avec des risques de projections importants(BELJEROU.Y)

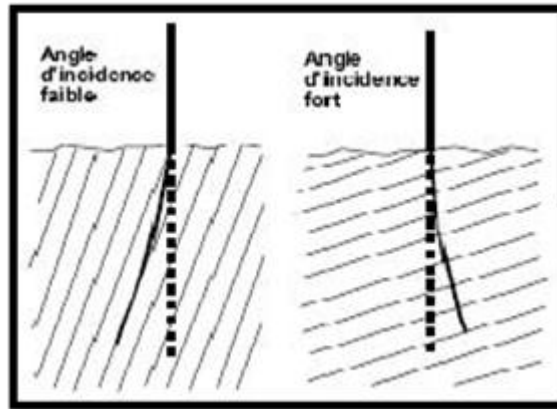


Figure 3.4 : schéma représentatif de La déviation de foration

### 3.1.2. Paramètres liés au bourrage

#### 3.1.2.1. Hauteur et disposition du bourrage dans les trous

Le bourrage a pour objectif de réduire les projections et d'améliorer l'effet de gaz des explosifs. Il doit être suffisant pour éviter le phénomène de travail "en cratère" de la dernière charge. En règle générale, la longueur du bourrage dépend de la banquette. Dans les trous profonds, sa longueur doit être égale à la banquette, alors que dans les courts trous, elle peut descendre à 0,5 fois la banquette.

Dans la plupart des cas, en exploitation minière et en carrière à ciel ouvert, le bourrage est disposé en fonction des fissures, de l'hétérogénéité de la banquette et de l'utilisation de gros diamètres de trous. Le bourrage intermédiaire permet dans le premier cas d'obtenir une fragmentation sélective, dans le deuxième de prévenir la perte d'énergie, et dans le troisième d'éviter une surconsommation d'explosif (beldjerou younes).

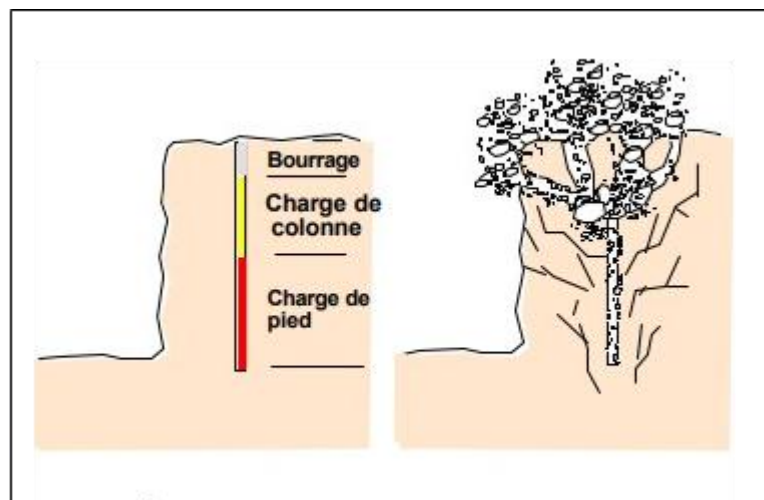


Figure 3.5 : Schéma représentatif de la disposition du bourrage dans les trous (Beldjerou.Y)

### **3.1.2.2. Qualité du matériau de bourrage**

En Algérie, les produits de foration sont couramment utilisés comme bourrage dans les mines et carrières. Toutefois, des expériences ont montré que cette méthode conduit souvent à des projections et des débourages importants lors du tir.

Des tirs expérimentaux ont montré que le bourrage aux gravillons de taille comprise entre 4 et 6 offre une meilleure utilisation de l'énergie explosive.

### **3.1.3. Paramètres géométriques**

#### **3.1.3.1. Banquette**

La distance entre la première rangée de trous et l'arrêt supérieur du gradin est représentée par cette dernière. Dans le cas d'une rangée de trous d'abattage, la banquette représente la largeur du volume à abattre par l'énergie explosive contenue dans la rangée.

Les facteurs qui ont un impact sur le choix de la banquette sont les suivants :

Différence de diamètres des trous ;

La taille du gradin ;

Les angles des trous ;

La fragmentation prévue et l'explosivité de la roche.

Les trous de mines sont disposés en plusieurs lignes pour extraire la roche, selon une géométrie théoriquement définie qui est principalement influencée par le diamètre de foration utilisé. L'épaisseur de roche entre les lignes est connue sous le nom de banquette.

#### **3.1.3.2. L'espacement entre les trous successifs**

L'espacement des trous en surface d'un schéma de forage est un paramètre qui ne dépend que de la qualité de l'implantation de la maille en surface et de la qualité de l'implantation du début de forage.

Un espacement égal à 1,25 fois la banquette donne généralement de bons résultats. En modifiant l'espacement de la banquette entre [0.8 ; 1.5] fois, il est possible d'obtenir une bonne fragmentation sans augmenter l'énergie de la charge particulière.

#### **3.1.3.3. Le rapport de maille**

Le rapport d'espacement des trous par rapport à la largeur de la banquette dépend des objectifs spécifiques du tir :

Pour obtenir une bonne fragmentation, il est recommandé d'avoir un rapport aussi élevé que possible, généralement compris entre 1,2 et 1,5.

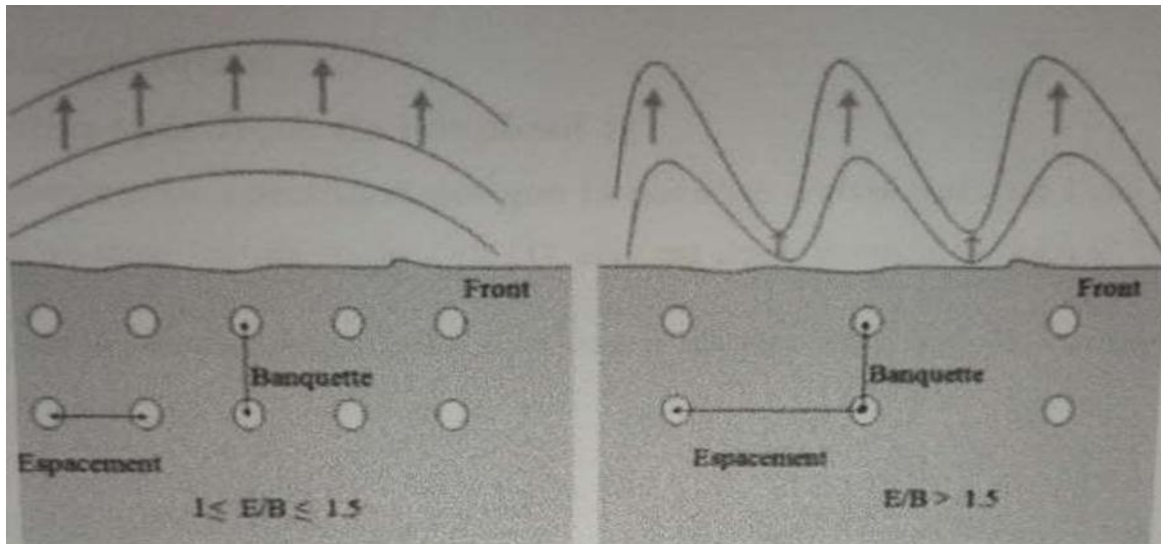
Pour obtenir un profil de front régulier ou pour des raisons pratiques, le rapport d'espacement peut être proche de l'unité.

Pour la production d'enrochement, il est conseillé de réduire le rapport à une valeur inférieure à l'unité.

En général, un compromis de 1,2 est souvent retenu. Cela signifie que les trois configurations de maille possibles sont les suivantes :

- Maille carrée lorsque B (la largeur de la banquette) est égale à E (l'espacement des trous).
- Maille rectangulaire lorsque B est inférieur à E.
- Maille rectangulaire inversée lorsque B est supérieur à E.

Le rapport de maille dans les tirs à retards dépend de la séquence d'initialisation des charges explosives.



**Figure 3.6 :** Schéma représentatif des Paramètres géométriques (Bouterfif.L200)

### 3.1.4. Paramètres lié à l'énergie d'explosif

Effectivement, les paramètres tels que la nature du massif et les caractéristiques des roches influencent le choix du type d'explosif à utiliser. Dans le cas de roches dures peu fracturées, qui nécessitent un abattage plus intense, des explosifs à forte densité et à vitesses de détonation élevées sont préférables. Ces explosifs à forte brisance permettent de créer de nouvelles surfaces pendant la fragmentation, ce qui facilite l'abattage de la roche.

En revanche, dans les massifs fracturés où les blocs du tas abattu sont principalement délimités par des discontinuités préexistantes, un explosif de faible densité avec une vitesse de détonation moins importante peut suffire. Dans ce cas, l'objectif n'est pas de créer de nouvelles surfaces, mais plutôt de séparer les blocs existants le long des fractures déjà présentes.

Le choix du type d'explosif dépend donc de la nature du massif, de la résistance des roches et de la fragmentation souhaitée. Une analyse attentive de ces facteurs permet de déterminer l'intensité et les caractéristiques nécessaires de l'explosif pour obtenir les résultats désirés lors de l'abattage.

#### 3.1.4.1. Rapport de charge (consommation spécifique)

Le rapport de charge, également appelé consommation spécifique, est la quantité d'explosif requise pour abattre 1 mètre cube de roche ou 1 tonne de minerai.

Les carrières et les mines ont fourni, dans leur expérience pratique, les valeurs suivantes pour le rapport de charge :

- Granite, gneiss, basalte.....180 à 270 g/ m<sup>3</sup>
- Grès et schiste.....200 à 300 g/ m<sup>3</sup>
- Hématite compacte.....100 à 135 g/ m<sup>3</sup>
- Calcaire.....75 à 110 g/ m<sup>3</sup>.

Pour assurer une fragmentation efficace, la distribution de l'explosif le long du trou doit être uniforme. En ce qui concerne la charge d'explosif, le trou peut être divisé en trois sections:

- Charge de fond.....1.3 V
- Charge de colonne.....H - 2 V
- Bourre..... $V\sqrt{H+0.3V}$

#### 3.1.4.2. Effet des ondes réfléchies

En effet, lorsqu'un tir est réalisé près d'une face libre contenant une discontinuité importante, l'interaction entre l'onde de contrainte émise et la discontinuité joue un rôle crucial. L'onde se divise en une onde transmise qui se propage à travers la discontinuité et une onde réfléchie qui est renvoyée en arrière.

La répartition de l'énergie entre l'onde transmise et l'onde réfléchie dépend du rapport des impédances des matériaux de part et d'autre de la discontinuité, ainsi que des caractéristiques de cette discontinuité.

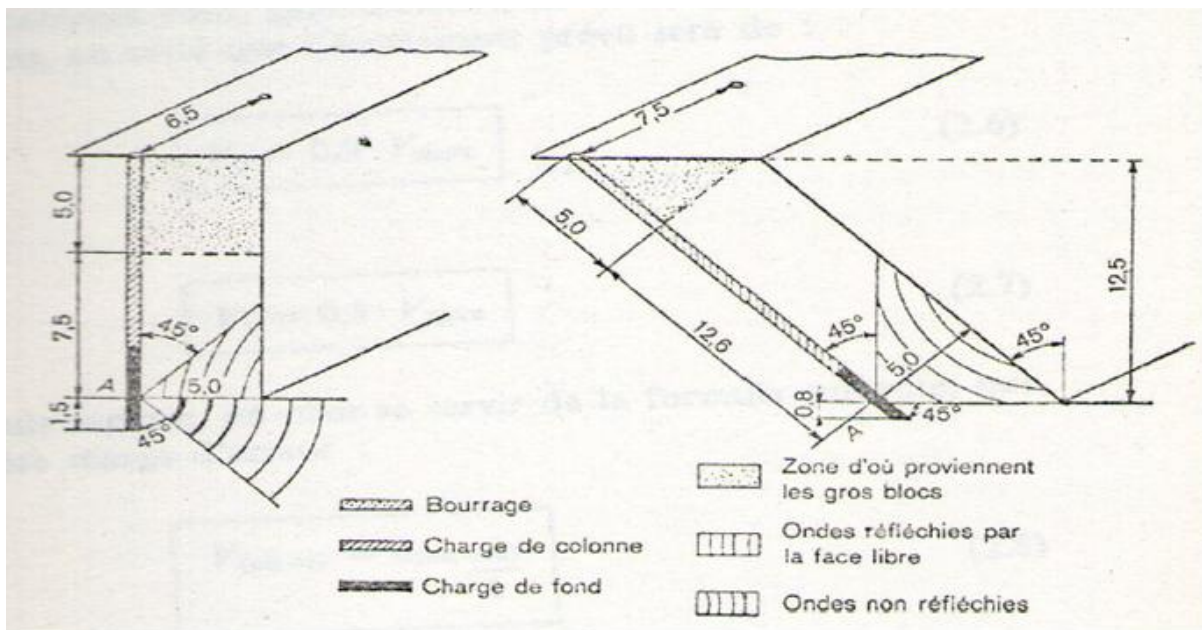
Dans le cas de l'interface entre la roche et l'air, la réflexion est généralement presque totale. L'onde de compression se transforme en une onde de traction lors de la réflexion, ce qui peut entraîner des contraintes dépassant la résistance à la traction de la roche. Cela se produit lorsque la distance entre la source de l'onde et la discontinuité est faible. Un phénomène d'écaillage se produit alors, avec l'apparition de fissures parallèles au plan de l'onde.

La présence de nombreuses micro-fissures dans le massif a deux effets sur la propagation de l'onde. Premièrement, cela affaiblit le pic de contrainte, réduisant ainsi les contraintes maximales

induites par l'onde. Deuxièmement, cela diminue les fréquences associées aux ondes de contrainte, ce qui réduit les phénomènes vibratoires.

Les ondes réfléchies jouent également deux rôles importants. Elles peuvent modifier l'orientation des fissures radiales existantes et initier de nouvelles fissures. Ainsi, de nouvelles fissures perpendiculaires à l'écaillage initial peuvent apparaître près de la surface libre.

Ces phénomènes d'interaction entre les ondes et les discontinuités sont importants à prendre en compte dans la planification et l'exécution des tirs, car ils peuvent avoir un impact significatif sur la fragmentation de la roche et la sécurité des opérations (Berdoudi.S 2021).



**Figure 3.7:** schéma représentatif de l'Effet des ondes réfléchies

### 3.1.4.3. L'énergie libérée

par un tir peut être principalement celle de l'onde de choc ou de 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.

$$E_c = \frac{4\pi}{d_u c_u} R^2 \int p(t)^2 dt$$

Où :



**P (t)** - est l'enregistrement de la pression en fonction du temps ;

**R** - est la distance charge-capteur ;

**du** - est la masse volumique du milieu (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.

$$T = K_1 E^{\frac{1}{3}} + c (K_1 E^{\frac{1}{3}})$$

Où :  $K_1$  et  $c$  – sont des constantes qui dépendent de l'énergie du gaz.

L'énergie des gaz

**E**- est calculée par régression linéaire en fonction du temps **T**.

Dans tous les cas, un couplage parfait entre la charge et le trou assure un transfert sans perte de l'énergie de l'explosion au massif. Il s'ensuit donc un travail de fragmentation plus efficace. C'est notamment le cas où l'on utilise des explosifs en vrac.

Par ailleurs, les objectifs de fragmentation et de foisonnement influencent aussi le choix du type de l'explosif. Cette courbe caractérise principalement la nature de l'explosif, le couplage roche-explosif et la nature de la roche (Bouterfif.L 2006).

## 3.2. Les paramètres incontrôlables

### 3.2.1. Paramètres liés au massif rocheux (incontrôlable ou difficilement contrôlable)

#### 3.2.1.1. Le massif rocheux

Actuellement, nous avons une compréhension satisfaisante des mécanismes de la transmission de l'énergie explosive au massif rocheux. Toutefois, la quantification de cette transmission et l'impact des propriétés du massif sur cette dernière relèvent encore de la recherche scientifique. L'interaction entre le massif et la charge explosive est essentielle. En raison de sa fragilité, il est nécessaire de préparer un plan de tir minutieux, comme c'est couramment le cas dans les exploitations de roches ornementales. En revanche, abattre un massif composé de matériaux hétérogènes, très fracturé ou karstifié, est extrêmement difficile, en particulier lorsque les discontinuités sont ouvertes (massif décomprimé). Le rendement du tir sera médiocre et les conditions de travail deviendront complexes, notamment en raison d'une mauvaise précision de la foration, d'une instabilité des parois des trous de tir, de la présence d'eau, de difficultés pour charger l'explosif, des risques de rupture du circuit d'amorçage, ainsi que d'effets arrière importants (Beldjerou.Y 2017)

### 3.2.1.2. L'influence de la matrice et des hétérogénéités de nature

Les caractéristiques de la roche ont une influence significative sur plusieurs aspects :

- Les performances du fourrage ;
- La transmission de l'énergie explosive au massif rocheux ;
- La fragmentation de la roche.

Une classification de la facilité de fragmentation d'un massif rocheux par tir a été proposée par Muller (1997) en se basant sur la mesure de son impédance (vitesse x densité) et la taille moyenne des blocs présents dans le massif in situ ou la blocométrie. Le premier paramètre est lié à la composition de la matrice rocheuse, tandis que le second dépend de la densité des discontinuités et de la matrice rocheuse elle-même.

Dans des conditions assez rares, la nature de la matrice rocheuse peut poser des problèmes pour le bon déroulement d'un tir. En raison de leur bonne conductivité, certains types de roches peuvent perturber le fonctionnement de l'amorçage des volées. Ce cas extrême est également dû en partie au fait que les dispositifs de tir utilisés à l'époque étaient probablement moins sécurisés qu'aujourd'hui.

### 3.2.1.3. Indice de tirabilité :

Cunningham (1987) soutient que dans la plupart des cas, le facteur de la roche (A) doit se situer dans la plage de 8 à 12. Ce facteur est utilisé pour prendre en compte la nature des roches ainsi que l'orientation des structures géologiques par rapport à la direction du tir. Il a été adapté par Cunningham en 1987 en se référant à l'indice de tirabilité (blastibility index) développé par Lilly (1986) de la manière suivante :

$$A = 0,06(RMD + JF + RDI + HF)$$

Où :

- RMD : facteur de description de la masse rocheuse ;
- JF (JPS+JPO) : facteur d'espacement et d'orientation des joints (facteurs de joints) ;
- RDI : influence de la densité de la roche ;
- HF : facteur de la dureté de la roche (Berdoudi.Y 2021).

### 3.2.2. L'hydrologie

La présence d'eau dans un terrain constitue toujours une préoccupation majeure pour les mineurs, car elle pose trois types de problèmes liés à la foration, au choix de l'explosif et à son rôle dans le processus d'abattage.

Tout d'abord, l'eau a tendance à réduire la résistance de la roche, ce qui facilite la pénétration de l'outil de foration et augmente la vitesse instantanée de foration. Cependant, la diminution de la

résistance de la paroi du trou peut entraîner des éboulements localisés et mettre l'outil de foration en danger de coincement.

L'usage de nitrate-fuel, un explosif sensible à l'eau, est interdit dans les opérations d'abattage. Il existe une grande variété d'explosifs insensibles à l'eau, mais ils ont un coût sensiblement plus élevé que le nitrate-fuel.

Le rôle précis de l'eau dans le processus d'abattage fait l'objet de discussions et de controverses. Cependant, quelques idées peuvent être émises :

L'eau sert de couplage entre l'explosif et la roche, occupant l'espace entre l'explosif en cartouche et la paroi du trou. Cela augmente l'impédance acoustique globale du produit de détonation (par augmentation de leur densité), améliorant ainsi le transfert d'énergie vers la roche. La présence d'eau limite la détente des gaz de détonation, ce qui accroît la pression exercée sur la paroi.

Les expériences montrent que le bourrage à l'eau est efficace. Sur le plan théorique, il est également démontré que l'inertie de la masse d'eau est suffisante pour permettre une augmentation de la pression des gaz de détonation dans le trou avant l'éjection de la colonne liquide.

Si l'eau contenue dans la matrice rocheuse n'a probablement aucune influence sur la propagation des vibrations, celle présente dans les discontinuités joue un rôle favorable dans la transmission des vibrations. Il est connu que l'eau, tout comme la plupart des fluides, transmet bien les vibrations longitudinales (mais pas les ondes de cisaillement). Ainsi, l'eau assure un "couplage hydrique" entre les différents blocs constituant le massif rocheux.

L'amortissement des vibrations est donc considérablement réduit, favorisant ainsi le travail de l'explosif dans le massif fracturé. De plus, l'eau altère les résistances au cisaillement des discontinuités, ce qui rend le massif rocheux globalement moins résistant et donc plus propice à l'abattage.

## **Conclusion**

En conclusion, la planification minutieuse du tir à l'explosif et la prise en compte des paramètres clés sont essentielles pour obtenir des résultats optimaux tout en garantissant la sécurité des opérations. Le plan de tir à l'explosif permet de définir les différentes étapes et les paramètres spécifiques qui influenceront directement les effets de l'explosion. En considérant des facteurs tels que la géologie du site, la disposition des trous de forage, la quantité et la distribution des explosifs, ainsi que les mesures de confinement et de sécurité, il est possible d'optimiser la fragmentation des roches, le déplacement des matériaux et la protection des infrastructures environnantes. De plus, une bonne compréhension des paramètres influençant

les tirs à l'explosif permet d'améliorer la précision et la maîtrise de ces opérations, minimisant ainsi les risques potentiels et les impacts indésirables. En mettant en œuvre un plan de tir bien élaboré, les professionnels de l'explosif peuvent atteindre les résultats souhaités de manière plus efficace, tout en garantissant la sécurité des personnes et de l'environnement.

Chapitre

04

### Introduction

Plusieurs méthodes d'estimation de la fragmentation ont été (et sont encore) développées. Un effort croissant a été réalisé en ce qui concerne la prédiction de la taille des blocs obtenus à partir de tirs à l'explosif. Des approches très sophistiquées aux plus rustiques, toutes se heurtent à des obstacles majeurs qui traduisent la difficulté d'une représentation réaliste des conditions de tir:

- ❖ L'impossibilité matérielle de cartographier les conditions géologiques de chaque tir ;
- ❖ L'existence de paramètres incontrôlables ou difficilement appréciables tels que la déviation des trous de forage ;
- ❖ Dans la majorité des cas, on n'accède qu'à une information "de surface", qui n'est qu'un reflet de la granulométrie en volume du tas.

La raison d'être de ces modèles est à la fois technique et économique . En effet, ils permettent, avant un tir, d'en simuler les résultats. Cela permet ainsi de trouver les paramètres du tir qui donnerait les résultats recherchés.

Ces modèles peuvent être classés selon plusieurs types :

1. Modèles algébriques – Ces modèles reposent sur des lois physico-chimiques fondamentales pour décrire ce qui se passe pendant un tir. Les résultats du tir sont ainsi calculés par un ensemble d'équations.
2. Modèles de comportement composite – Ces modèles, qui ont vu un norme essor ces dernières années en parallèle avec l'évolution rapide des ordinateurs, modélisent la génération de fissures dans le massif rocheux sous les contraintes dynamiques. La méthodologie commune de ces modèles est l'emploi de la méthode des éléments finis ou de la méthode des différences finies pour analyser l'état de contrainte lors de la formation des fissures et l'influence de ces fissures sur l'état de contrainte. Ils diffèrent dans la manière dont l'état de contrainte est modélisé et dans le calcul de la formation de fissures.
3. Modèles empiriques – Ces modèles sont souvent fondés sur le résultat d'études menées au laboratoire ou sur le terrain. Il s'agit d'établir les relations entre les résultats et les paramètres du tir à partir de ces observations sans pour autant cerner les mécanismes fondamentaux concernés.
4. Modèles mécaniques – Ces modèles analysent les phénomènes associés à un tir à plusieurs composantes. Chaque composante peut être étudiée séparément et est décrite par un mécanisme. Les résultats du tir sont ensuite estimés par le biais d'un schéma

global qui relie ces diverses composantes.

#### **4.1. Modèles algébriques**

Dolgov (1983) a proposé une relation exprimant l'énergie totale générée par un explosif. Celle-ci peut être divisée en énergie produisant les déformations élastiques et plastiques  $E_v$  et l'énergie pour créer de nouvelles surfaces  $E_s$  :

$$E = E_v + E_s$$

Toutefois,  $E_s$  est négligée dans le calcul.  $E_v$  dépend d'une propriété intrinsèque de résistance de la roche. La formule tient compte de la fracturation initiale présente dans le massif en calculant l'énergie théorique nécessaire pour fragmenter un massif sain et homogène de façon à arriver à l'état de fracturation initial.

Person (1983) a essayé de calculer l'énergie nécessaire pour fragmenter une roche en utilisant les principes fondamentaux des mécanismes de la fracturation. Les calculs ont donné des quantités nécessaires d'explosif environ 1000 fois inférieures à celles utilisées dans la pratique. Ces résultats sont plutôt surprenants et posent des questions fondamentales sur le mécanisme couramment accepté dans la fragmentation du massif ; l'auteur pense que les contraintes compressives pourraient jouer un rôle plus important dans la fragmentation de roches que celui généralement admis.

Rossmann et Knasmillner (1983) ont développé des équations de l'interaction des ondes de contrainte dans les limites des couches. Ils ont fait des essais d'étude dynamique par photoélasticité sur des matériaux en couches ; Des trous circulaires ou carrés y ont été faits pour simuler des tunnels. Ils ont montré que la séparation des couches se produit du fait des réflexions obliques des ondes ; Ces essais ont démontré l'importance des joints et des plans de stratification dans l'interaction onde-structure et dans le processus de fragmentation.

SakovetSher (1983) ont appliqué une simplification en 2D pour étudier la contrainte produite sur un milieu infini par une pression ponctuelle générée dans un cercle. Ceci simule un long cylindre d'explosif. Ils ont ensuite développé des équations pour calculer la propagation des deux fissures diamétralement disposées autour du cercle. Les essais ont été faits sur des plaques de Plexiglas. Un résultat intéressant est qu'à partir d'une certaine limite, l'augmentation de la charge d'explosif n'améliore pas d'une manière significative la fragmentation.

Grady et Kipp (1979, 1980) ont calculé le taux de croissance d'un ensemble statistique de fractures en fonction de l'état de contrainte et la relaxation de contrainte qui résulte de la propagation des fractures. Les équations simultanées ont été employées pour estimer l'état de

contrainte et l'endommagement,  $D$ . Ce dernier est défini comme la proportion de volume de matériau fracturé et modifie les constantes d'élasticité par un facteur  $(1-D)$ . Cette théorie est utilisée dans beaucoup de modèles de comportement composite.

## 4.2. Modèles de comportement composite

### 4.2.1. Le modèle «Bedded Crack» et de code 'SHALE'

Margolin et Adams ont développé un modèle composite de comportement qui s'appelle «Bedded Crack Model» (BCM) pour la simulation numérique de la propagation des ondes de contrainte, de la fracturation et de la fragmentation dans les roches; le modèle est fondé sur la théorie de Griffith sur la propagation de fissures. Une taille critique des fissures est calculée en fonction de leur orientation et du champ de contrainte existant. Les fissures dépassent cette taille s'agrandissent pour un pas d'itération. Ces fissures modifient ensuite le comportement global de la roche qui lui est décrit par le module effectif. L'évolution de la distribution statistique des fissures dans le massif est estimée pour chaque pas itératif du calcul.

Ce modèle composite de comportement a été utilisé dans le programme SHALE pour simuler le tir en cratère dans des roches argileuses pétrolifères (Adams, et al, 1983). Toutefois, les résultats sont assez loin de ceux obtenus expérimentalement, comme montré dans la figure suivante.

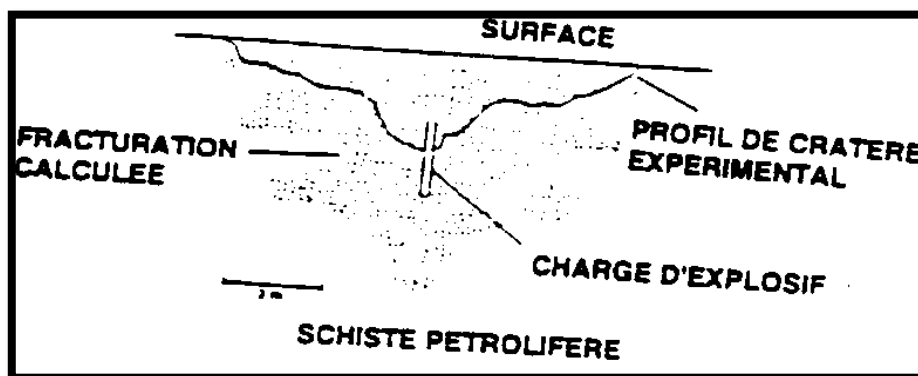


Figure 4.1 : Comparaison du profil expérimental et calculé du massif fracturé par le logiciel SHALE (d'après Adams et al, 1983)

### 4.2.2 Modèle NAG-FRAG

Un autre modèle, appelé NAG-FRAG et développé par McHugh (1983), fait croître les fissures autour de centres jusqu'à ce que celles-ci interceptent d'autres fissures ou bien les contraintes extérieures appliquées disparaissent. L'accroissement des fissures est modulé par un seuil de contrainte, une fonction-seuil d'accroissement et un paramètre de sensibilité à



la fracturation propre à la roche. L'auteur a fait des validations du modèle et a trouvé des résultats qui s'accordent avec les données expérimentales. Toutefois, une roche homogène, en l'occurrence du tuf volcanique, a été utilisée pendant l'expérimentation.

### 4.3. Modèles empiriques

#### 4.3.1. Modèle KUZ-RAM

Le modèle empirique KUZ-RAM est actuellement très utilisé dans le domaine de l'évaluation des résultats des tirs miniers. Le modèle repose sur la loi de Kuznetsov pour calculer la taille équivalente à 50% de passants de fragments rocheux. Cette loi s'écrit :

$$x = A \left( \frac{V_o}{Q} \right)^{0.8} Q^{1/6}$$

**A** est le coefficient de la roche : 7 pour les roches moyennement dures, 10 pour les roches dures très fracturées, et 13 pour les roches dures peu fracturées) ;

**V** : le volume spécifique en  $m^3$  de rocher abattu par trou = la banquette \* espacement \* hauteur de gradin

**Q** est la masse en Kg d'équivalent de TNT de l'énergie fournie par la charge en explosif d'un trou.

Si  $Q_e$  est la masse en Kg d'explosif par trou et  $E$  la puissance relative de l'explosif, l'ANFO étant égal à 100 et le TNT à 115, on a  $Q_e \times E = Q \times 115$  et  $Q = Q_e E / 115$ . L'équation 2.2 donne

$$x = A \left( \frac{V_o}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \left( \frac{E}{115} \right)^{1/6} \left( \frac{E}{115} \right)^{-0.8}$$

où

$$x = A \left( \frac{V_o}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \left( \frac{E}{115} \right)^{-19/30}$$

$Q_e$  est l'inverse de l'énergie spécifique,  $E_s$  en Kg/m<sup>3</sup>. L'équation peut s'écrire donc :

$$x = A(E_s)^{0.8} Q_e^{1/6} \left( \frac{E}{115} \right)^{-19/30}$$

D'un autre côté de Rosin-Ramler décrit la distribution granulométrique détaillée de blocs. Elle s'écrit

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n}$$

Avec

**Y** = le pourcentage de passants à la taille **x**,

**X<sub>c</sub>** = taille caractéristique égale à la taille à 63.2% de passants,

**n** = indice de forme.

Pour **x**, (taille moyenne des blocs), on a **y** = 0,50, et donc

$$x_c = \frac{x}{(0.693)^{1/n}}$$

Il faut alors calculer **n** pour pouvoir décrire complètement la distribution. Cunningham, en utilisant le logiciel de simulation de Lowds pour estimer la distribution de taille de blocs dans le tas abattu (voir plus bas), a obtenu expérimentalement des valeurs de **n** pour différents paramètres géométriques du tir. Il a ensuite fait une régression sur les points pour obtenir un modèle permettant de calculer **n**. Ce modèle, dans sa forme la plus récente (1987), est:

$$n = [2,2 - (14 \times (B \square d)] \times [1 + (R-1) / 2] 0.5 \times [ (1 - (W/B)) \times (L \square H) ] \text{ (III.6)}$$

Où :

- **d** : diamètre de la charge (mm) ;
- **W** : déviation standard de la précision de forage (m) ;
- **B** : banquette (m) ;
- **R** : espacement /fardeau ;
- **H** : hauteur du gradin (m) ;
- **L** : longueur de la charge (m).

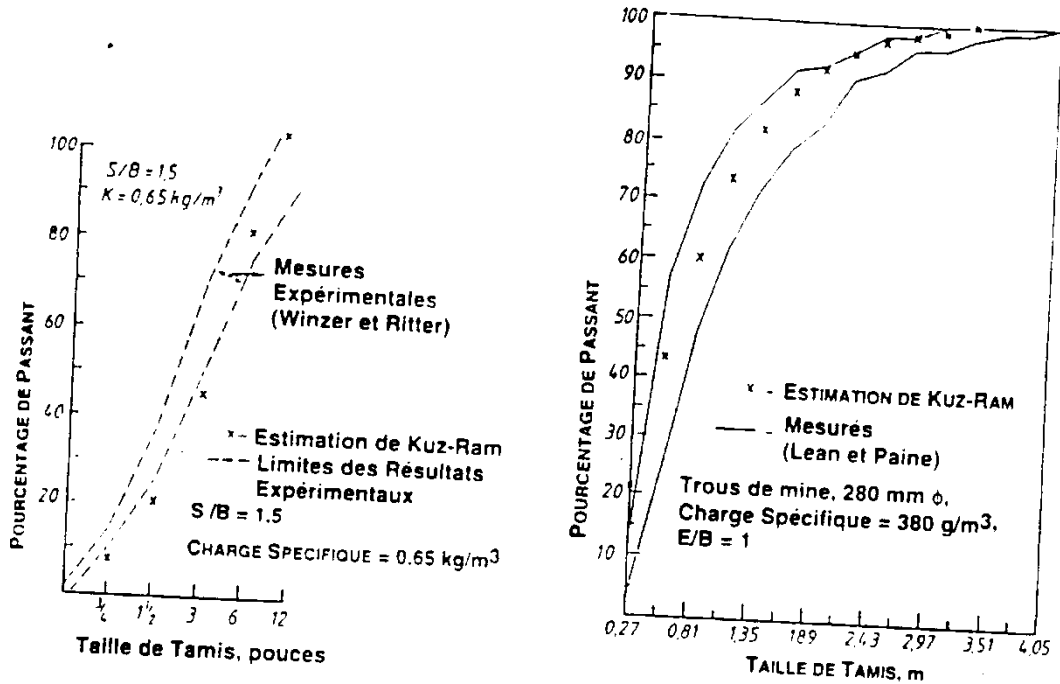


Figure 4.2 : Comparaison de la fragmentation mesurée

#### 4.3.2. Modèle de LANGEFORS

Langefors a bâti sa méthode après de nombreuses observations sur le terrain a savoir : - Les trous sont surforés sur une longueur de  $0,3V$ ,  $V$  étant la banquette au sens abattage, c'est à dire l'épaisseur de la tranche abattue ente la première ligne de trous et le front, ou entre deux lignes de trous; - La charge de pied s'étend sur une longueur de  $1,3V$ ; - La hauteur de bourrage est égale à la banquette  $V$ ; - La charge de colonne occupe la place restante dans le trou. Les notions sont celles du schéma ci-dessous

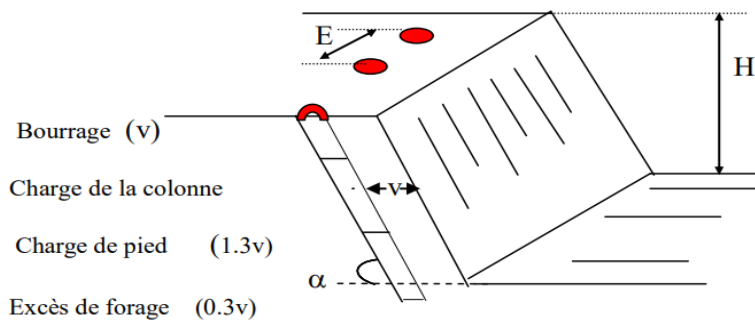


Figure 4.3 : schéma représentatif des paramètres de foration

H: hauteur du gradin, m

E: espacement entre les trous, m

V: banquette (tranche à abattre), m

$\alpha$ : Inclinaison du trou

Langefors raisonne alors ainsi: -La charge linéaire de pied :

$L_p = \rho \pi \varphi / 4$  , Ou encore :  $2 L_p = \rho(\varphi / 36)$  , lorsque  $\varphi$  est exprimée en mm,  $\rho$  en tonnes/m<sup>3</sup> et  $L_p$  en kg/m. -La charge linéaire minimale pour briser la roche, lorsque la banquette est V, est donnée par la relation empirique:

LANGEFORS a bâti sa méthode après de nombreuses observations sur le terrain. Nous rappelons ci-dessous ses hypothèses :

- Les trous sont surforés sur une longueur de  $0,3V$ , V étant la banquette au sens abattage, c'est-à-dire l'épaisseur de la tranche abattue entre la première ligne de trous et le front, ou entre deux lignes de trous;

La charge linéaire de pied: ou encore:  $L_p = \rho \cdot \pi \cdot \varphi^2 / 4$

- La charge linéaire minimale pour briser la roche, lorsque la banquette est V, est donnée par la relation empirique :

$$L_p = 0.88 \cdot (f/S_p) \cdot (E/V) \cdot [(0.07/V) + R + 0.004 \cdot V] \cdot V^2. \quad 2.9$$

f: facteur de contrainte dépendant de l'inclinaison du trou,

$S_p$  : coefficient de puissance pratique de la charge de pied « strength »

E: espacement des trous , m

V: banquette , m

R: résistance autirage (rock constant)

La quantité entre crochets est voisine de  $C = R + 0.04$  pour les valeurs de V usuelles (quelques mètres).

LANGEFORS égalise ensuite les relations précédentes pour obtenir la banquette maximale possible:

$$V_{\max} = (\varphi/33.8) \cdot \sqrt{[\rho \cdot Sp / (f \cdot C \cdot E / V)]} ,$$

Il ne reste qu'à déterminer la charge linéaire de colonne, ou charge médiane, que LANGEFORS fixe à 1/ 2.7 fois celle de pied:

$$L_c = (L_p/2.7) \cdot (1/f \cdot (Sp/Sc)), \quad 2.11$$

(le facteur de contrainte n'intervient pas pour la charge de colonne).

Les quantités d'explosif en pied et en colonne sont obtenues en faisant le produit des charges linéaires  $L_p$  et  $L_c$  par les longueurs chargées, celles-ci étant de figure

- 1.3V pour la charge de pied;
- $H/\cos(\alpha)$ -2V pour la charge de colonne.

Ces formules peuvent être assorties de quelques commentaires suivant les points suivants:

### 4.3.3. Suivant les caractéristiques de la roche

LANGEFORS résume toutes ces caractéristiques à l'application d'un seul paramètre R la résistance au tirage, sur la valeur de 0.2 à 1, et que sa valeur la plus courante est de 0,4 il est donc dommage que LANGEFORS n'ait pas été plus explicite sur les valeurs que pouvait prendre le paramètre R.

Nous avons recalculé à posteriori la valeur de R pour quelques roches, d'après des statistiques de consommation.

### 4.3.4. Géométrie du tir

Le rapport E/V appelle rapport de maille apparaît dans les formules, ce rapport s'est avéré important au niveau des résultats du tir en particulier on améliore la fragmentation en augmentant sa valeur. Pour LANGEFORS, les résultats sont optimaux lorsque E/V se situe entre 1,2 et 1,5 ces valeurs sont d'ailleurs celles généralement pratiquées.

Le facteur f (facteur de contrainte) traduit la difficulté qu'a le pied de se dégager, en fonction de l'inclinaison des trous. Ainsi  $f=1$  pour  $\alpha=0^\circ$ , 0,9 pour  $\alpha=20^\circ$  et 0,85 pour  $\alpha=30^\circ$ .

### 4.3.5. Ajustement des paramètres du tir

La banquette varie selon une fonction linéaire du diamètre du trou, et selon la racine carrée du rapport, ces tendances correspondant assez bien aux résultats observés sur le terrain. En pratique, compte tenu des explosifs et des roches rencontrées en France, l'expression suivante donne une fourchette :  $V = (30 \div 45) \cdot \phi$ .

Il est possible d'appliquer un certain nombre de corrections sur la valeur de  $V_{\max}$  afin de tenir compte de la précision de forage, du foisonnement des matériaux lorsqu'un tir comprend plus de deux rangées de trous, de la fragmentation recherchée.

### 4.3.6 Selon le forage

Les trous n'étant pas rigoureusement parallèles et pouvant être mal positionnés, LANGEFORS applique une correction à la banquette maximum:

$$V = V_{\max} - 0.05.H$$

#### 4.3.7. Selon le foisonnement (ou le «swelling»)

Dans le cas d'un tir en plusieurs rangées, les premières rangées empêchent les suivantes de sortir. La solution consiste à incliner les trous et à réduire la maille :

$V = V_{\max} \cdot (1 - 0.03H)$  pour une inclinaison de  $26^\circ$ , de façon à augmenter la charge spécifique d'explosif.

#### 4.4. Selon la fragmentation des roches

La fragmentation est essentiellement réalisée par la charge de colonne. LANGEFORS reste assez discret sur cette question,

Nous citerons simplement ici une formule proposée par HOLMERSG:

$$\text{Log}(T) = 0.29 \cdot \text{Log}[V^2 \cdot \sqrt{1.25/(E/V)}] - 1.18 \text{Log}(q/R) - 0.82, m$$

Les corrections proposées par LANGEFORS visent à augmenter la charge spécifique au  $m^3$  abattu. Cette augmentation est obtenue par une réduction de la maille, sans augmentation de la quantité d'explosif par trou.

Ceci est logique dans la mesure où LANGEFORS que le pied du trou est déjà complètement rempli par l'explosif.

#### 4.5. Modèles physiques

Zheng et al. (1987) ont fait des tests sur les modèles en béton pour déterminer la banquette optimale dans le cas de la détonation d'un trou. Par la suite, ils ont fait varier la banquette et l'espacement entre deux trous pour établir l'effet de l'espacement sur la fragmentation. Ils ont établi une relation linéaire entre le volume de fragments rocheux et la banquette. Ceci montre selon eux qu'on peut réduire la banquette en augmentant convenablement l'espacement entre les trous.

Bergmann (1983) a étudié les résultats des tirs expérimentaux menés sur des blocs de granite, calcaire et grès de 15 tonnes. Il en a tiré une relation empirique comme mesure de l'efficacité d'un explosif et les conclusions suivantes :

- a) la vitesse de détonation est importante jusqu'à un certain point pour obtenir une meilleure fragmentation. En effet, celle-ci est obtenue lorsque la vitesse de détonation est plus faible que la vitesse sismique du massif. Lorsque cette dernière est dépassée, aucune amélioration ne s'en résulte.
- b) Les explosifs de densité plus élevée donnent une meilleure fragmentation à condition qu'il n'en résulte pas un travail d'expansion moindre ou une vitesse de détonation plus faible.
- c) Un bon couplage explosif-paroi du trou donne une meilleure fragmentation.

Rustan et al. ont fait deux séries de tests au laboratoire sur des modèles faits d'un mélange de matériaux d'une part (de la magnétite et du béton dans des proportions différentes) et de blocs à échelle réduite de matériaux naturels d'autre part (gabbro, quartzite, granite et magnétite). Ceci pour déduire l'influence sur la fragmentation des paramètres tels que la banquette, l'espacement, la charge spécifique et les caractéristiques géométriques du matériau. Les résultats importants de cette étude peuvent être résumés ainsi :

- a) La taille de banquette demeurant constante, la taille des blocs est inversement proportionnelle à la charge spécifique. Généralement, elle augmente avec la banquette.
- b) La densité du matériau semble avoir un effet sur la taille des blocs : les matériaux plus denses donnent une fragmentation plus grossière.
- c) La taille des blocs est plus grande pour les matériaux ayant plus de cohésion.

Les auteurs ont aussi étudié les relations existant entre les propriétés physiques des matériaux et leur comportement pendant les tirs. Ils ont pu tirer les conclusions suivantes:

1. La banquette critique dépend de l'impédance du matériau.
2. La banquette critique dépend aussi de la résistance à la traction du matériau.
3. Enfin, l'impédance du matériau influence aussi la fragmentation résultante.



Toutefois, il faut signaler que ces études ont été menées sur des matériaux sains

#### **4.6.Modèles mécaniques**

##### **4.6.1.Modèle BLASPA**

Favreau (1983) a mis au point un logiciel appelé BLASPA qui considère l'énergie de gaz comme étant le facteur principal responsable de la fragmentation. Immédiatement après la détonation de la charge, l'expansion des gaz transmet un onde de choc de contrainte traversant le massif à une vitesse CR égale à 4600 m/s (Figure 2.4). Cette onde ne cause pourtant pas un endommagement important étant une contrainte de compression. Une fois réfléchi sur la face libre, elle se transforme en une contrainte de traction et traverse de nouveau le massif engendrant des fissures primaires (l'action de brisance). L'expansion des gaz accélère l'ébranlement du massif – une surface délimitée sous l'action de l'expansion des gaz et devant laquelle le massif n'est affecté que par les fissures primaires. Cette limite se déplace à la vitesse de 1200 m/s près du trou et à 300 m/s près de la face libre. La roche fracturée éclate alors avec une vitesse de déplacement de 4 à 30 m/s. La fragmentation finale est ainsi le résultat de l'action combinée de la brisance, l'expansion des gaz et la commination pendant le déplacement du front.

Ce programme a été appliqué dans les mines ainsi que dans le cadre de la recherche sur les stockages souterrains des déchets nucléaires dans les massifs cristallins profonds et a donné de bons résultats. Il faut noter toutefois que le modèle ne tient pas compte de l'état initial de la fracturation du massif.

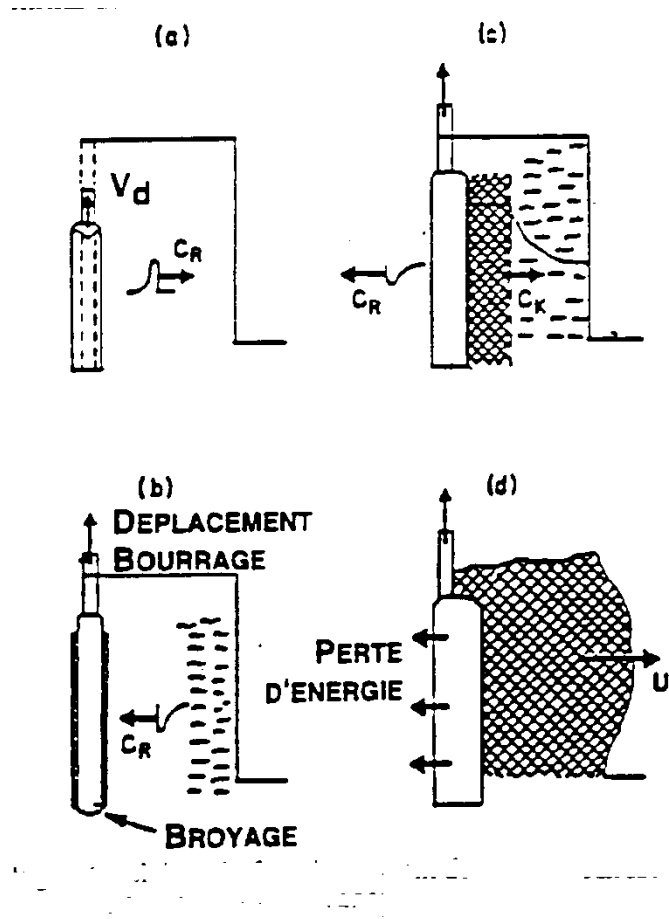


Figure 4.4 : Schéma du fonctionnement du logiciel BLASPA (d'après Favreau,1983)

#### 4.6.2.Modèle FRAG

Lowds (1983) a développé le programme FRAG principalement pour estimer la distribution de taille des blocs. Il n'utilise pas un modèle de comportement composite pour simuler la roche pendant le tir. Le programme emploie des critères géométriques simples pour tracer les fissures se propageant à partir d'une série de trous de tir. La taille d'un bloc est ensuite estimée sur la base de ces "fissures" tracées. Les résultats de plusieurs simulations par la méthode de Monté Carlo sont ajustés à la loi de Rosin-Ramler pour obtenir une distribution de taille de blocs.

**4.7. Autres modèles**

Da Gama (1983) a proposé une méthode de prédiction de la taille des blocs résultants d'un tir. En partant de la loi de comminution de Bond (1952), l'auteur a déduit une relation générale du type :

$$P_s = aW^b \left( \frac{S}{B} \right)^c$$

où

$P_s$  = pourcentage passant de taille  $S$

$W$  = énergie totale de la charge par unité de poids de rochers abattu,

$B$  = banquette,

$a, b, c$  = paramètres empiriques dépendant du type d'explosif utilisé, des propriétés mécanique de la roche et de la maille de foration,

Cette relation a été utilisée sur les données provenant des 7 tirs différents. L'auteur a obtenu l'équation de régression suivante :

$$P_s = 1,451 W^{0.114} S^{0.484} B^{-0.121} F^{-0.163} \quad 50$$

Avec un coefficient de corrélation de 0.82 sur les 7 cas testés.

Le modèle proposé par Zou (1987), contrairement au modèle développé par Favreau, donne plus d'importance aux ondes de contraintes pour fragmenter le massif. L'expansion des gaz ne fait alors que foisonner le massif déjà fragmenté par les ondes de contraintes. L'auteur a utilisé les équations de contrainte dans le cas des charges sphériques et les relations d'atténuation établies par Ito et Sassa (1966) pour calculer les contraintes en un point quelconque du matériau. La distribution de taille de la roche fragmentée est proportionnelle à la distribution d'énergie dans le massif. Le modèle tient compte de la distribution in-situ de la roche à l'état initial. La fragmentation finale est déterminée comme étant la somme des probabilités de la distribution de taille des blocs naturels et de la distribution de taille des blocs fragmentés d'un massif homogène, isotrope et élastique soumis à  $n$  tirs.

Harries (1983) a modélisé des colonnes de charge d'explosifs comme une série de charges sphériques. Chaque charge sphérique envoie une pression transitoire selon la théorie

développée par Favreau. Les résultats de calcul sont en accord avec les valeurs expérimentales mesurées sur plusieurs roches. Le modèle d'atténuation adopté est appelé à  $Q$  constant qui postule que la perte d'une partie de l'énergie pour chaque oscillation varie selon le facteur de qualité  $Q$  de la roche.

Kleine (1988) a développé un modèle basé sur la capacité du massif à absorber l'énergie d'un cycle de pulsation sinusoïdale. Ce paramètre intrinsèque donné est appelé paramètre d'atténuation de l'énergie sismique et est mesuré sur le terrain par un dispositif spécial. La charge d'explosif est modélisée comme une colonne de segments discrets amorcés d'une façon séquentielle. Chaque segment devient ainsi une source de vibrations atténuées au passage dans le massif en utilisant le paramètre décrit plus haut. Par conséquent, la distribution de l'énergie en un point quelconque du massif peut être calculée. Une fonction caractéristique de la fragmentation du massif est utilisée pour estimer la distribution de taille résultante. La fonction est déterminée par l'énergie totale fournie par le tir et la distribution in-situ des tailles de blocs. Cette dernière est évaluée en tenant compte des discontinuités présentes dans le massif.

Le modèle a été appliqué à deux mines souterraines mais a donné des résultats dispersés au niveau de la distribution de taille des blocs des tas abattus. L'auteur a toutefois remarqué que les différences sont tolérables et raisonnables compte tenu des incertitudes au niveau des données de la fracturation et de la mesure des blocs des tas abattus.

Ghosk (1990) a proposé un modèle multi-fractures d'un tir en gradin en utilisant la méthode des éléments finis pour étudier la propagation des fissures en association avec les théories de la fragmentation. Le modèle étudie aussi l'effet des discontinuités présentes dans le massif et utilise la distribution de Schumann pour comparer la distribution de taille des blocs du massif et du tas abattu. L'auteur insiste sur le caractère fractal de la distribution des discontinuités dans le massif et de la propagation des fractures pendant les tirs. Ceci, évidemment, conduit à considérer la distribution des tailles des blocs in-situ et du tas abattu comme ayant aussi un caractère fractal. Son utilisation facilite ainsi l'estimation de la taille des blocs in-situ et dans les tas abattus.

# Chapitre

# 05

# Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

## INTRODUCTION

La conception d'un tir s'appuie sur un certain nombre de données variables et d'éléments propres à l'entreprise qu'il faut s'efforcer de connaître ou de définir. Avant d'entreprendre la conception, il faut :

- a. Bien définir les objectifs techniques et économiques et en particulier ceux qui concernent la granulométrie et les coûts;
- b. Caractériser le massif (au moins la fracturation en place et la résistance de la roche, l'hydrogéologie et les hétérogénéités);
- c. Bien connaître les possibilités complètes des matériels disponibles à l'amont du tir pour la foration, ainsi qu'à l'aval, pour le chargement et dans certains cas, le concasseur (ce dernier point devrait constituer un objectif technique, à cause de sa limite d'ouverture);
- d. Connaître les caractéristiques principales des explosifs disponibles: leur densité, leur énergie (si possible mesurée sous l'eau), leur résistance à l'eau;
- e. Préciser les contraintes de l'environnement (distance des installations Riveraines et niveaux acceptables maximum de vibrations, bruit, projections et Poussières).

Ces cinq éléments recensés ci-dessus permettent de choisir, parmi les paramètres de base du tir

### 5.1. Description de la zone d'étude :

**Gradin 1030 : Axe Sud Est :** Exploitation des réserves situées au-dessus du niveau 1035.

Ce niveau affecté par trois familles de discontinuités :

- 1/ Deux séries de joints de stratifications parallèles de direction N85° 35'S ET N115° 57 N
- 2/ fissure DIRECTION N32° 75'W

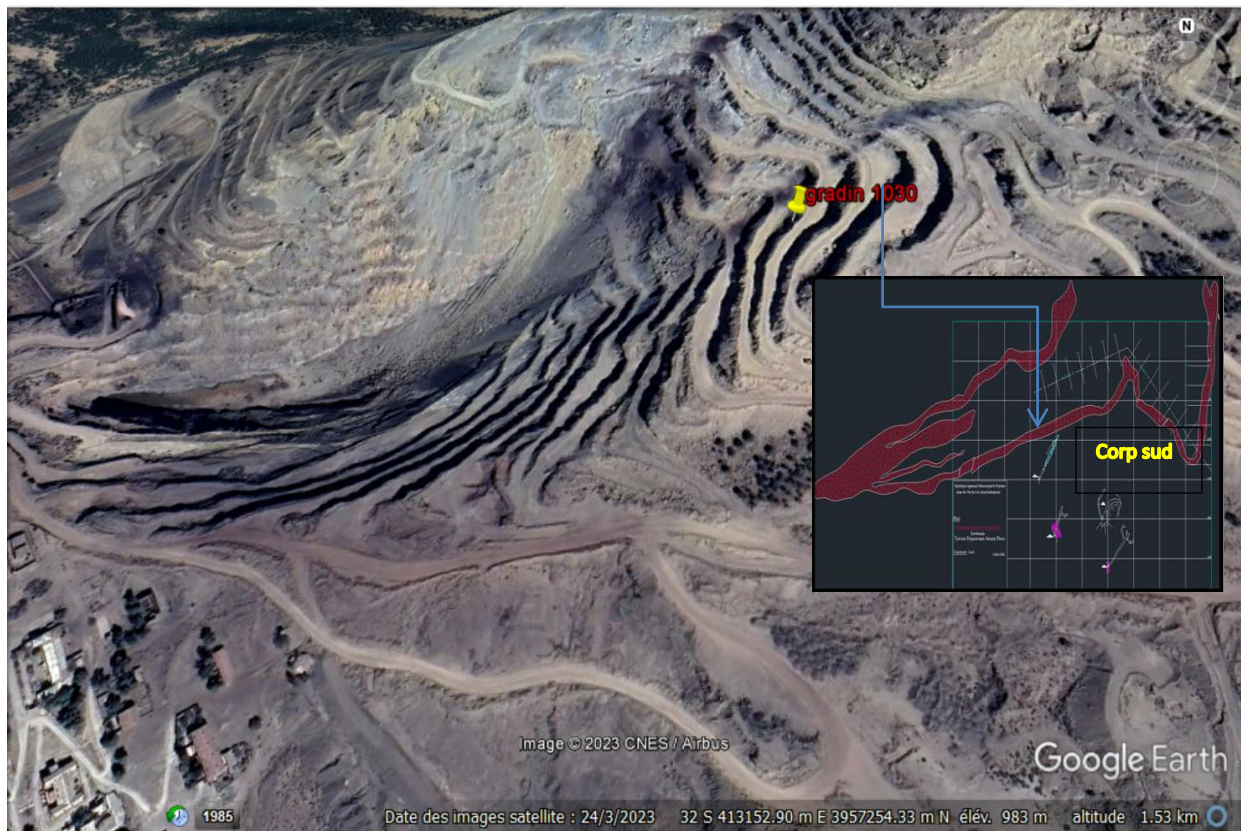
les familles de discontinuité	pendage	Direction
A	35S	85 N
B	75 W	32 N
C	57N	115N
GRADIN	80 W	0N

**Tableau 5.1 :** les orientations des familles de discontinuités

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

Ces discontinuités sont présentées par des joints de stratification dont :

- la distance entre les joints est varié de 0,11 à 0,39
- joint ouvert à une épaisseur de 0,03
- joint fermé avec remplissage d'argile ou des marnes



**Figure5.1** : photo représentatif de niveau 1030(google earth)

# Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030



Figure 5.2 : Présentation stéréographique de discontinuités

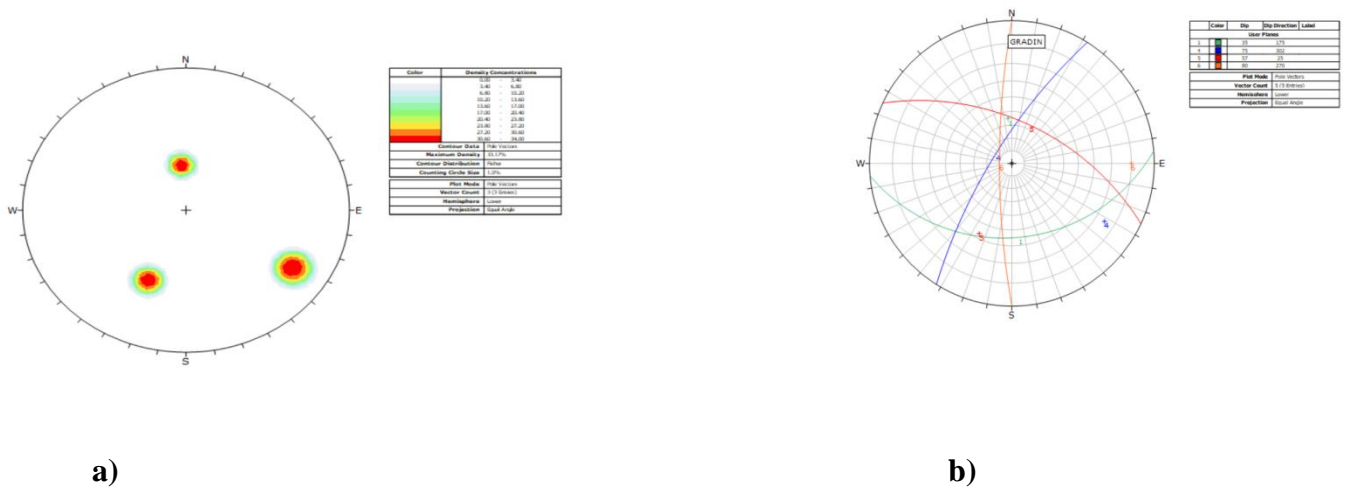


Figure 5.3 : Présentation stéréographique a) Nombre de familles existées

b) Projection des fissures par rapport au gradin 1030



## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

### 5.2. Analyse des travaux de forage et de tir au niveau de la Mine de Boukhadra

**La foration :** s'effectue aux moyens de sondeuses, de chariots, et de marteaux perforateurs, les diamètres de chariots, et de marteaux perforateurs, les diamètres des trous de foration sont respectivement de 160 mm, 80 mm et de 26 mm,

**L'abattage :** s'effectue à l'explosif par tir électrique avec un schéma et plan de tir:

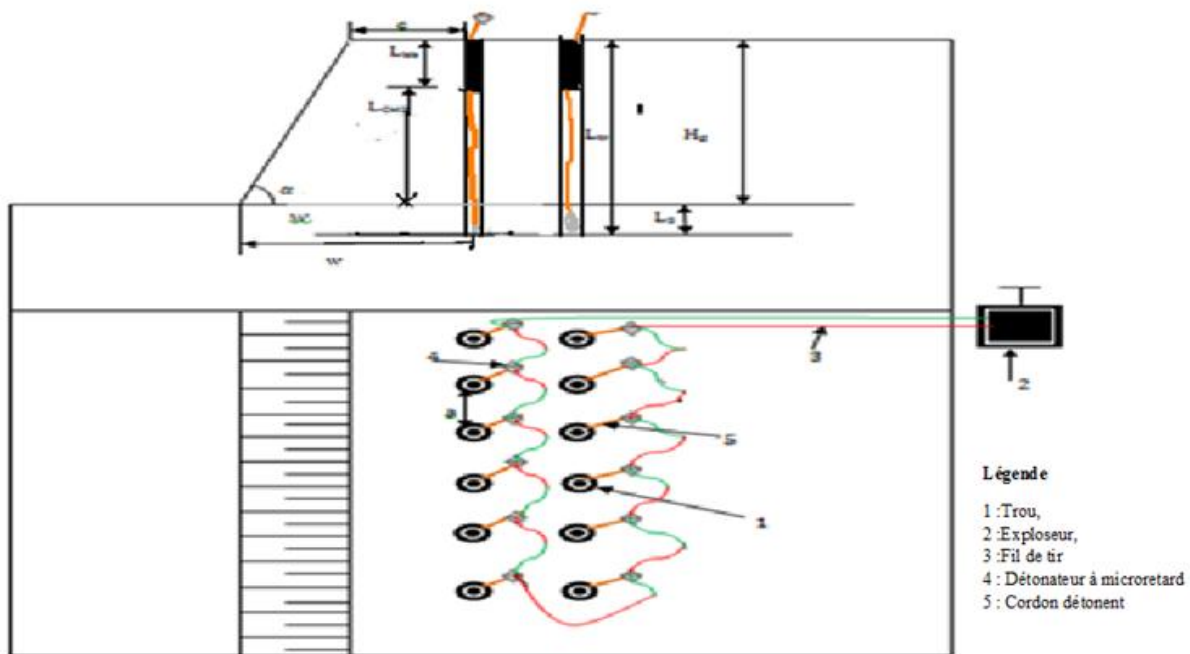


Figure 5.4: Schéma de plan de tir

#### Légende :

$L_b$  : Longueur de bourrage ; m

$W$  : Ligne de moindre résistance ; m

$L_{ch}$  : Longueur de la charge ; m

$\alpha$  : Angle de talus de gradin ;<sup>0</sup>

$L_S$  : Longueur de sous forage ; m

$a$  : Distance entre les trous ; m

$H_g$  : Hauteur de gradin ; m

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

**Tableau 5.2 :** Plan de tir actuel dans la section Ciel Ouvert dans la mine de BOUKHADRA

Les paramètres	unité	valeurs
Hauteur du gradin	m	15
Inclinaison du gradin	degré	80
Diamètre du trou	mm	165
Longueur du trou	m	16
Longueur du sous forage	m	01
Longueur du bourrage finale	m	5
Longueur du bourrage intermédiaire	m	02
Ligne de moindre résistance	m	05
Volume abattu théorique	M <sup>3</sup>	2400
Charge d'un trou	kg	100-120
Quantité globale des explosifs	kg	1200
Charge instantanée ou unitaire	kg	120-240
Distance entre les trous	m	04
Longueur de rangée de tir	m	40
Nombre de trous		10
Nombre de rangées		01

Les explosifs utilisés pour le tir sont le Marmanit et le Milanit .



**Figure 5.5 :** Une boule d'explosif type « Marmanit » de 2.5kg

- Sensibilisé au moyen d'un explosif brisant;
- Couleur grise;
- Aspect pulvérulent;
- Considéré comme un explosif de sûreté;
- Sensible à l'eau;
- Efficace dans les roches sèches de moyenne dureté;
- Utilisé dans les régions sèches. Il est adapté aux terrains à roches tendres ou de dureté

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

moyenne.

Le Milanit est ainsi un explosif caractérisé par :



**Figure 5.6 :** Sac à deux couches emballé par explosif type « Milanit » de 20kg

- Couleur blanc rose ;
- Aspect pulvérulent ;
- Peu sensible aux actions mécaniques ;
- Considéré comme explosif de sûreté ;

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

- Très facile à manipuler ;
- Mauvaise résistance à l'eau ;
- Sa vitesse de détonation diminue avec la diminution du diamètre des trous ;
  
- Cet explosif est particulièrement recommandé en milieu sec pour des rochestendres et des travaux à ciel ouvert.

**Remarque :** Jusqu'à présent, les travaux sont basés sur ce type d'explosif (Milanit) a été recommandé par **L'ONEX** sans donner leur caractéristiques mécaniques (vitesse de détonation,.....) , c'est pour quoi on a basé dans notre étude sur l'anfomul.

**Le schéma de tir représente ci-dessous**

# Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

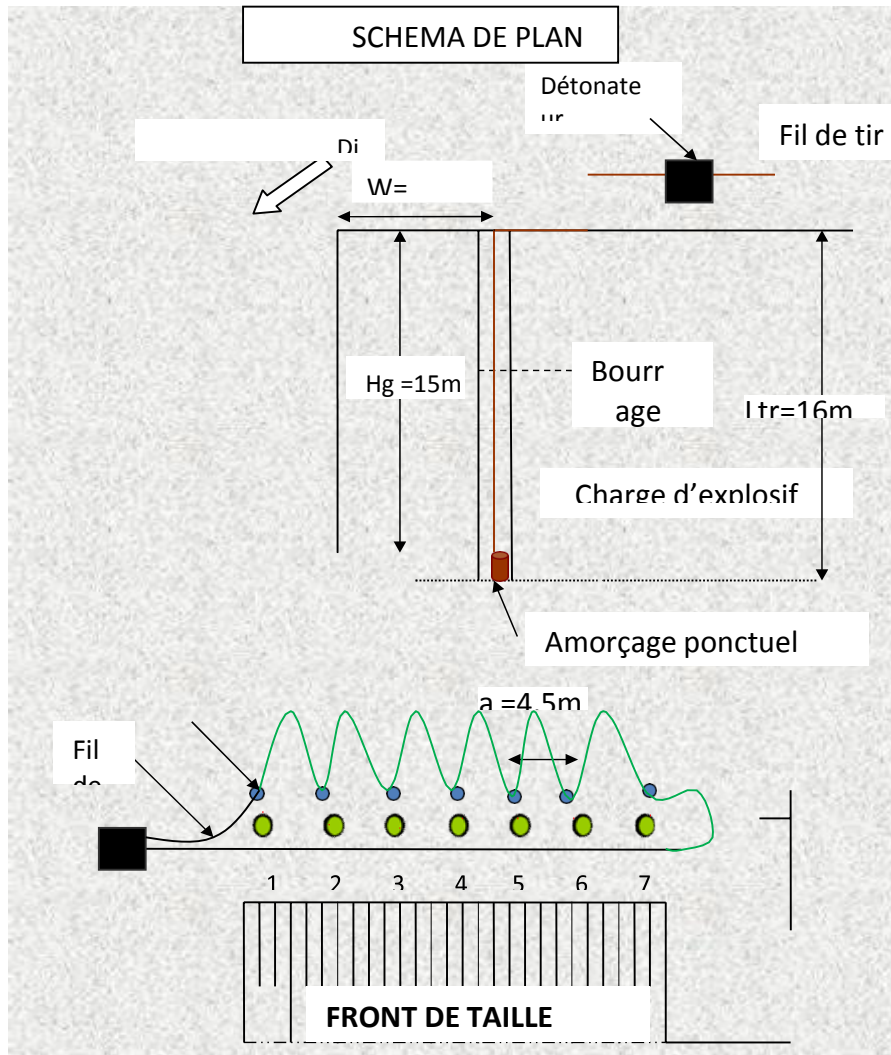


Figure 5.7 : Schéma du Plan de tir.

Constatations après tir :

[Type text]

# Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

1/ Mauvaise fragmentation apparait dans le tas abattu

a/ Présence des horst gabarits supérieur à  $1\text{m}^3$     b/ projection du blocs



2/ Effets arrière de tir



3/ Mauvais découpage au pied du gradin



**Figure 5.8** : Effets de tir au niveau gradin 1030

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

**Tableau 5.3** : paramètres de tir (calculés)

Paramètre	Symbole	Formule	Résultat
Diamètre de trou	<b>D<sub>tr</sub></b>		165mm
La longueur de sous-forage	<b>L<sub>sf</sub></b>	$L_{sf} = K_s * D_{tr}$	1m
la longueur de trou	<b>L<sub>tr</sub></b>	$L_{tr} = H_g + l_{sf}$	16m
Consommation spécifique d'explosif étalon	<b>Q<sub>et</sub></b>	$Q_{et} = 0.02(\delta_{comp} + \delta_{tr} + \delta_{dép.}) + 2$	0.52kg/m
Charge métrique du trou	<b>P</b>	$P = (\pi/4) * D_{tr}^2 * \Delta$	10.78 kg/m
Ligne de résistance des roches au pied de gradin	<b>W</b>	$W = \sqrt{(0.56 * P^2 + (4 * m * q * H_g * L_{tr} * p)) - 0.75 * p / 2 * m * q * H_g}$	5m
Distance entre les trous de la même rangée	<b>A</b>	$a = m * w$	5m
Quantité d'explosif à mettre dans un trou	<b>Q</b>	$Q = q * a * w * H_g$	110 à 125 kg
La longueur de charge d'explosif	<b>L<sub>ch</sub></b>	$L_{ch} = Q/n$	12m
La longueur de bourrage totale	<b>L<sub>b</sub></b>	$L_b = L_{tr} - L_{ch}$	4m
volume des roches à abattre par un trou tiré	<b>V<sub>b/trou</sub></b>	$V_{b/tr} = w * a * H_g$	375m <sup>3</sup>
Volume de bloc à abattre	<b>V<sub>b</sub></b>	$V_b = (P_{an} / N_j) * N_{i/s} / V_b = v_{btr} * n_{tr}$	4000-5000 m <sup>3</sup>
Nombre de trous dans un tir	<b>N<sub>tr</sub></b>	$N_{tr} = V_b / V_{b/tr} ; \text{trous}$	10 trs
Quantité totale d'explosif	<b>Q<sub>Tex</sub></b>	$Q_{Tex} = Q * N_{tr}$	1200kg
La largeur d'enlevure	<b>A</b>	$A = w + b (n-1)$	5 m
Longueur du bloc à tirer		$L_b L = V_b / A * h_g$	60 m
Volume linéaire de foration	<b>L<sub>F</sub></b>	$L_F = N_{tr} * L_{tr}$	165 m
Longueur de tas abattu	<b>B<sub>ts</sub></b>	$B_{ts} = k_r * k_b * H * Q^{1/2}$	28.64m
Hauteur de tas abattu	<b>H<sub>ts</sub></b>	$H_{ts} = (0.5 \_ 0.8) * H$	9m



## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

### 5.3. ANALYSE DE LA FRAGMENTATION PAR LE MODEL DE KUZ-RAM

La distribution granulométrique est contrôlée par l'interaction de la propagation des fissures, de l'adhérence, de la liaison et de la propagation des ondes de choc avec certaines surfaces libres et les propriétés physiques de la matrice rocheuse. Cette interdépendance est très complète. C'est la première raison qui nous oblige à utiliser un modèle empirique pour prédire la distribution granulométrique. Ces règles empiriques ne sont pas très précises, mais elles sont toujours populaires et utiles, dans ce cas est utilisé le modèle Kuz-Ram (Kuznetsov, Cunningham, Lilly).

#### 5.3.1. MODELE KUZ-RAM

Le modèle Kuz-Ram combine deux formules semi empiriques dans le but de prédire la distribution des dimensions des fragments de roche abattus. La formule développée par Kuznetsov, 1973, a été utilisée pour prédire le diamètre du morceau moyen du tas de roche abattu, qui se base sur l'utilisation du TNT comme explosif. A son tour en 1982, Cunningham a développé une formulation plus généralisée de l'équation de Kuznetsov valable pour les autres explosifs commercialisés. Plus tard, en 1987, Cunningham incorpore à ce modèle le concept de Lilly, concernant le facteur de tir (index de tirabilité) comme mesure valable de la fragmentation des roches par le tir à l'explosif. La distribution des dimensions des fragments est présentée comme la fonction de Rosin-Rammler, avec une forme très similaire à l'équation décrivant la longueur des blocs intacts dans la masse rocheuse (Priest and Hudson, 1981).

La probabilité d'une longueur intacte de la roche moins que la dimension spécifiée :

$$F(x) = 1 - e^{-ax}$$

- a : densité moyenne des fractures
- X : distance entre les fissures

Cette équation indique que la forme de la courbe de distribution des fragments de Kuz-Ram dépend de la distribution des fissures et discontinuités préexistantes dans la masse rocheuse.

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

Ainsi, le mécanisme de l'abattage à l'explosif décrit ci-dessus, assumé par le modèle

Kuz-Ram, est une extension et union de fractures préexistantes dues aux contraintes de traction du massif générées par le trou de mines.

### Équation de Kuznetsov

Conformément au modèle kuz-Ram, le diamètre du morceau moyen peut être calculé par l'équation suivante :

$$X = A \times \left( \frac{V}{Q} \right)^{0,8} \times Q^{0,167} \times \left( \frac{E}{115} \right)^{-0,633}$$

- X : diamètre du morceau moyen (cm)
- A : facteur de la roche
- V : volume de la roche abattue (m<sup>3</sup>)
- Q : masse d'explosif par trou (kg)
- E : puissance relative de l'explosif, (ANFO = 100)

### Équation de Rosin-Rammler

La distribution des dimensions des fragments est donnée par l'équation de Rosin-Rammler, qui est une fonction exponentielle négative, de la forme:

$$R(x) = 1 - e^{-\frac{x}{x_c} \times n}$$

- R : proportion (%) du matériau passant le crible d'ouverture X
- X : ouverture du crible (cm)
- X<sub>c</sub> : dimension caractéristique (D60, cm), (calculée à partir du diamètre moyen)
- n : coefficient d'uniformité

### Équation de Tidamn

La puissance de l'explosif est calculée à partir d'une équation modifiée développée initialement par Tidaman:

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

$$E = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n}\right)^2 \times RWS$$

- VOD e : vitesse de détonation effective de l'explosif, m/s
- VOD n : vitesse de détonation nominale de l'explosif, m/s
- RWS: Puissance relative de l'explosif (relative weight strenght)

### 5.3.2. Principe du fonctionnement du modèle de Kuz-Ram

Les étapes de fonctionnement du programme sont :

1. Introduire les caractéristiques des roches étudiées (densité, module de Yong et la résistance à la compression).
2. introduire les paramètres des discontinuités du massif.
3. Introduire les caractéristiques des explosifs utilisés pour l'abattage des roches étudiés.
4. introduire les valeurs de l'espacement, la banquette et le coefficient de disposition du plan de tir.
5. Le programme fait le calcul des pourcentages des différentes catégories des Fragments (fines, moyennes et hors gabarits)
6. Les résultats seront obtenus sous forme d'un graphe et tableau pour il sera interprété.

### 5.3.3. Application du modèle de KUZ-RAM

1/ Utilisation des paramètres actuels de la mine de Boukhadra

2/ Utilisation des paramètres proposés pour la mine de Boukhadra

#### 5.3.3.1. Données de base de du modèle de KUZ-RAM

**Les dimensions admissibles des blocs :**

La granulométrie admissible de gros bloc après tir est limitée par les dimensions de l'ouverture du concasseur  $C_u$  de la trémie b

$$C_u \leq 0,8 \cdot b, \text{ m où } b = 1\text{m}$$

Alors  $C_u = 0,8 \cdot 1 \longrightarrow C_u = 0,8 \text{ m}$  (oversize) surdimensionné

# Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

## 2/ Paramètres des fragments ciblés

**Tableau :** les paramètres des fragments pour toutes les opérations

<b>Paramètres de fragmentation ciblés</b>	
Sur-dimensionné	0,8 m
Optimum	0,4 m
Sous-dimensionné	0,01 m

## 3/ Propriétés des roches intactes

<b>Propriétés des roches intactes</b>		<b>unité</b>
Facteur de roche A = 13 pour les roches dures peu fracturées		
Type de Roche	Minerai de fer	
Masse spécifique de Roche	2.7	SG
Module d'Elasticité	21	Gpa
Résistance Compression	78.4	Mpa

**Tableau 5.4 :** Propriétés des roches intactes.

## 4/ Paramètres des fissures

<b>Fissuration</b>		<b>unité</b>
Espacement	0,25	m
Pendage	35 ET 75	degré
Direction de Pendage	175 ET 302	degré
Bloc in-situ	0,25	m

**Tableau 5.5 :** Paramètres des fissures

## 5/ Paramètres d'explosif

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

Explosifs		unité
Densité		SG
RWS	100%	% Anfomil
Vitesse Nominale VOD	4000	m/s
Vitesse Effective VOD	3000	m/s

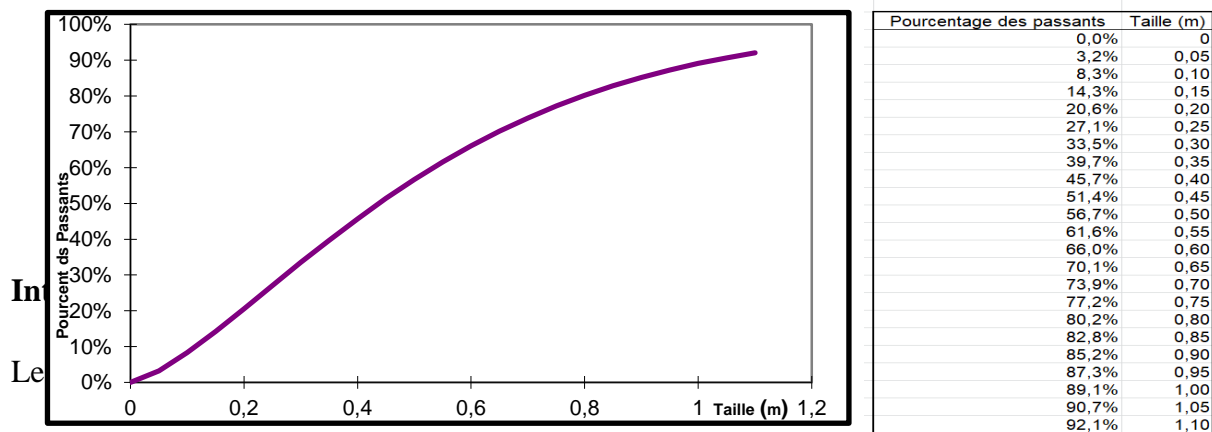
**Tableau 5.6 : Paramètres d'explosif**

Analyse de la fragmentation (paramètres actuels de la mine de Boukhadra ou l'angle du talus est de 80° (inclinaison du trou 10°)

### 5.4. Résultats d'évaluation

**Tableau : Répartition de roches abattues**

<b>Fragmentation prévue</b>		Indice de tirabilité	7,62
Pourcent sur-dimensionné	19,8% m	Taille moyenne du matériau	44 cm
Pourcent dans la gamme	79,8% m	Exposant d'uniformité	1,41
Pourcent sous-dimensionné	0,3% m	Taille caractéristique	0,57 m



### Calcul des Paramètres de tir en fonction de l'inclinaison du trou par la méthode de Langefors

L'inclinaison du trou est un paramètre qui permet un bon foisonnement de la roche. Elle est en fonction de la hauteur du front et des conditions de stabilité de la roche. Si la hauteur du front est

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

inférieure à 10m, l'angle d'inclinaison est compris entre 0° et 10°. Si la hauteur du front est supérieure à 10 m, l'angle d'inclinaison est compris alors entre 5° et 30°.

Les trous inclinés favorisent l'efficacité de la fragmentation des roches et la diminution des pertes d'énergie de charge dans le massif et la perte d'énergie pour la destruction du pied du gradin.

La pratique de l'abattage montre que l'utilisation de trous inclinés diminue la production des blocs hors gabarit de 8 à 25 % et augmente le rendement des pelles mécaniques de 1,5 fois.

L'inclinaison du trou influe sur la qualité de fragmentation, le dégagement du pied et les fissurations d'effet arrière.

Une inclinaison entre 10 à 20° par rapport à la verticale peut apporter les avantages suivants :

- Meilleure rupture du pied;
- Allongement du trou, donc des charges explosives plus favorables au rendement;
- Moins de blocs en tête, avec moins d'effet arrière sur le bord du gradin;

### Analyse de la fragmentation des paramètres obtenus par la méthode de Langfors par KUZ-RAM

**Tableau 5.7 :** Paramètres de tir par la méthode existe et Langfors

Paramètres	Unité de mesure	Existant dans la carrière	Valeurs Calculé
Diamètre du trou ( $D_{tr}$ )	mm	165	165
Hauteur du gradin ( $H_{gr}$ )	m	15	15
Inclinaison du trou ( $\beta$ )	Degré (°)	30	30
Longueur d'excès de forage ( $L_{ex}$ )	m	1	1.41
Longueur du trou ( $L_{tr}$ )	m	16	17.54
Banquette pratique	m	5	4.70
Distance entre les trous (a)	m	4	5.25
Quantité d'explosif dans un trou ( $Q_{tr}$ )	Kg/trou	42.8	27.25

## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

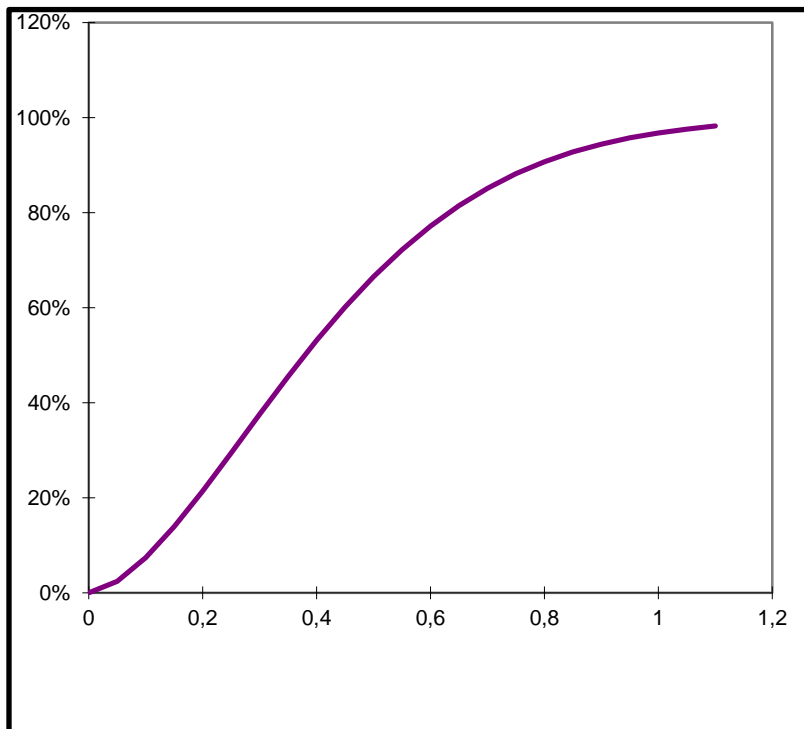
Longueur de bourrage ( $L_b$ )	m	3.4	4.70
Longueur de la charge d'explosif ( $L_{ch}$ )	m	11.85	12.84
Consommation spécifique de l'explosif ( $q_p$ )	Kg/m <sup>3</sup>	0.5	0.12
Type de cordeau détonant	gr/ml	12	12
D.E.I	N°	0	0
D.M.R	N°	1 à 12	1 à 12

### Résultats d'analyse

Paramètres de fragmentation ciblés	
Sur-dimensionné	0,8 m
Optimum	0,4 m
Sous-dimensionné	0,01 m

Fragmentation prévue	
Pourcent sur-dimensionné	9,3% m
Pourcent dans la gamme	90,5% m
Pourcent sous-dimensionné	0,2% m

Indice de tirabilité	7,62
Taille moyenne du matériau	38 cm
Exposant d'uniformité	1,65
Taille caractéristique	0,47 m



Pourcentage des passants	Taille (m)
0,0%	0
2,4%	0,05
7,4%	0,10
13,9%	0,15
21,4%	0,20
29,4%	0,25
37,6%	0,30
45,5%	0,35
53,1%	0,40
60,1%	0,45
66,5%	0,50
72,2%	0,55
77,2%	0,60
81,5%	0,65
85,1%	0,70
88,2%	0,75
90,7%	0,80
92,8%	0,85
94,4%	0,90
95,7%	0,95
96,8%	1,00
97,6%	1,05
98,2%	1,10

# Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

**Figure** :Distribution granulométrique des fragments de roche dans le gradin 1030

## Résultats et interprétation

La méthode de Langefors prend en considération l'inclinaison des trous de forage de mine, ce qui est en conformité avec notre thème d'étude. Cette méthode se base sur certains paramètres dont la banquette V, l'inclinaison qui nous intéresse particulièrement. Aussi nous avons traité les données (paramètres) réelles de la mine de Boukhadra par la méthode Langefors et les résultats obtenus se résument en :

- Diminution de la consommation spécifique,
- Augmentation du sous forage et par conséquent la longueur du trou,
- Augmentation de la distance entre les trous de mine,
- L'inclinaison est liée au calcul de la Banquette (facteur de contrainte  $f$  variable selon les objectifs tels que diminution des Hors Gabarits, bon découpage de pied du gradin... nous avons choisi délibérément une inclinaison de  $70^\circ$  du talus que nous avons estimé adaptable aux conditions d'exploitation et de sécurité des personnes, du Matériel et des ouvrages de la Mine,

Une simulation a été effectuée par la méthode de Kuz Ram pour une évaluation, à titre comparatif, des résultats obtenus par les paramètres du plan de tir réel de la Mine et de ceux de Langefors.

- Hors Gabarits : baisse de 19.8 % à 9.3 % (Langefors),
- La prédiction de fragmentation des Hors Gabarits par le modèle Kuz Ram est un outil de vérification simple, efficace et rapide dans les tas abattus,
- Baisse du coût d'exploitation.



## Chapitre V : Analyse de la fragmentation par modèle KUZ-RAM cas de la mine de Boukhadra niveau 1030

---

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons utilisé le modèle de KUZ-RAM pour étudier l'influence de l'inclinaison du trou sur le rendement de tir

Economiquement, l'obtention d'une réduction des blocs hors gabarits dans le tas abattu entraînant une réduction des dépenses dans l'opération de débitage secondaire.

# Conclusion générale

# Conclusion général

---

## Conclusions et recommandations

Après avoir accompli ce travail, nous avons pu développer nos connaissances dans le domaine du mécanisme de destruction à l'explosif. Nous sommes désormais compétents dans l'utilisation des outils nécessaires pour réaliser une étude d'analyse et de calcul des paramètres de base d'un plan de tir. Ce savoir a été acquis grâce à un stage effectué au sein d'une entreprise minière, en bénéficiant des contributions précieuses des personnes sur le terrain.

En conséquence, nous sommes en mesure d'appliquer nos recommandations dans un futur proche. Notre confiance en notre travail nous assure que les résultats des calculs seront satisfaisants. Les travaux de forage et de tir revêtent une importance capitale en ce qui concerne la préparation de la roche, car cela a un impact significatif sur les indicateurs techniques et économiques des processus technologiques ultérieurs, ainsi que sur la sécurité au travail et, de manière générale, sur l'efficacité des travaux en secteur minier.

Une simulation a été effectuée par la méthode de Kuz-Ram pour une évaluation, à titre comparatif, des résultats obtenus par les paramètres du plan de tir réel de la Mine et de ceux de Langefors. Hors Gabarit baisse de 19.8 % à 9.3 % (Langefors), la prédiction de fragmentation des Hors Gabarits par le modèle Kuz-Ram est un outil de vérification simple, efficace et rapide dans les tas abattus et baisse du coût d'exploitation.

Les calculs que nous avons effectués nous ont permis nous avons conclu grâce à nos recherches qu'il n'y a pas un paramètre qui a le plus d'effet ou un paramètre qui a le moins d'effet dans le plan de tir l'effet réside plutôt dans l'interdépendance et l'homogénéité de tous les paramètres et en tenant compte du lieu où il est appliqué. C'est ce que nous avons vu qu'à travers notre étude d'une caractéristique, le pourcentage a diminué de manière significative et observé, mais il n'a pas été amélioré ou inclus dans le champ acceptable pour cela. L'amélioration de la qualité de la fragmentation passe par l'étude de l'ensemble des facteurs qui influent sur ce paramètre et créer le plan idéal pour cela, analyser ses résultats et le suivre en permanence.

## Bibliographie

[1] BERDOUDI Said (2012 ETUDE DE LA MECANIQUE DE TIR DES ROCHES PAR UTILISATION DES MODELES REDUITS DANS LES CONDITIONS ALGERRIENNES) thèse de doctorat

[2] blasting. In Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation

[3] BOUTERFIF Leila 2006 étude de l'influence de discontinuités et de l'humidité sur l'emploi de l'anfomul dans les carrières

[4] BOUZIDA Younes & AGOUNE Koussaila 2021 Prédiction et amélioration de la qualité de la fragmentation des roches basée sur le modèle Kuz-Ram (modifié) sous Matlab

[5] Cunningham C.V.B, 1983\_ The Kuz-Ram model for prédiction of fragmentation from

[6] Cunningham C.V.B, 1987 \_ Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model: four

[7] DED (2014) d'entreprise de mine de Boukhadra

[8] HADJADJ Aoul Elias :Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 2017

[9] JOHN WILEY & SONS, INC; 665pages; 1996.

[10] Kuznetsov V.M, 1973 \_ the mean diameter of fragments formed by blasting rock. In

Lilly P. 1986\_ an empirical method of assessing rock mass blastability. In Proc. Large Open Pit Mining Conference (AusIMM), pages 89\_92, 1986.

Rosin Rammler, 1979, "the laws governing the fineness of powdered coal", J.Inst.Fuel, Soviet Mining Science, volume 9 (2), pages 144\_148, 1973.

[11] TERZAGHI, K; PECK, B.R; MESRI, G; «Soil Mechanics in Engineering Practice»; 3th years on. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by

[12] Younes BELDJEROU 2021 Détermination des paramètres du plan de tir par le modèle Langefors dans la carrière d'elm'hir djebel azrou