

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de la Terre
Département : Mines
Domaine : Sciences et technologie
Filière : Génie Minier
Spécialité : Exploitation des mines

Thèse

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences

**Influence de la structure du massif rocheux et de la
technique du tir sur les résultats de l'abattage cas de la
carrière d'Héliopolis, Guelma**

Présenté par : BAHLOUL Fatiha

Thèse soutenue le 04/02/2026

Jury de Soutenance :

BERDOUDI Said	Pr	Université Badji Mokhtar –Annaba	Président
HAFSAOUI Abdellah	Pr	Université Badji Mokhtar - Annaba	Encadrant
KIMOUR Mohamed	MCA	Université Badji Mokhtar - Annaba	Examineur
YAHYAOUI Sami	Pr	Ecole National Polytechnique - Alger	Examineur
SAADOUN Abderrazak	MCA	Université Abderrahmane Mira-Bejaia	Examineur
FREDJ Mohamed	MCA	Université Abderrahmane Mira-Bejaia	Examineur

Année Universitaire : 2025/2026

Table des Matières

Titre	Page
Abstract	VI
Résumé	VII
ملخص	VIII
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Introduction générale	XII
Chapitre I : Etude bibliographiques sur les paramètres qui influent sur la fragmentation des roches à l'explosif	1
I.1 Introduction	1
I.2 Facteurs contrôlables	1
I.2.1 Mécanisme de la fragmentation par explosif	1
I.2.2 La position du détonateur	2
I.2.2.1 Temps de détonation	2
I.2.2.2 Taux de chargement	2
I.2.2.3 Superposition d'ondes de contrainte	2
I.2.3 Longueur du trou	3
I.2.4 Diamètre du trou	3
I.2.5 Longueur de bourrage	4
I.2.6 Excès de forage (sous-foration)	4
I.2.7 La banquette	4
I.2.8 Rapport banquette/diamètre du trou	4
I.2.9 Rapport espacement/banquette	4
I.2.10 Facteur de poudre	5
I.2.11 Rapport hauteur du gradin/banquette	5
I.2.12 Déformation de la roche par explosif	5
I.2.13 Généralités sur les explosifs	6
I.2.13.1 Classification des explosifs	7
I.2.13.2 Travail de l'explosif	8
I.2.14 Ligne de moindre résistance	9
I.2.15 La maille de forage	10
I.3 facteurs incontrôlables	11
I.3.1 Caractéristiques de la masse rocheuse	11
I.3.2 Orientation des discontinuités	11
I.3.3 Espacement des plans de joint	13
I.3.4 Fréquence des discontinuités	13
I.3.5 Remplissage des joints	14
I.3.6 État des joints	15
I.4 Conclusion	15
Chapitre II : Aperçu sur la méthode et le model utilisés	16
II.1 Introduction	16
II.2 La méthode de Langefors	16

II.2.1 Paramètres du plan de tir	17
II.2.1.1 Coefficient d'inclinaison (C)	19
II.2.1.2 Résistance à la traction (R)	19
II.2.2 État de fracturation	19
II.2.3 Le rapport de rigidité (E/B)	19
II.2.4 La constante de Langefors	20
II.2.5 Les défauts d'implantation	20
II.3 Modèle Kuz-Ram	21
II. 3.1 Analyse de la distribution de la taille des fragments	21
II.4 Conclusion	26
Chapitre III: Etudes géologiques et minière de la carrière d'Héliopolis Guelma	27
III.1 Introduction	27
III.2 Description du site	27
III.3 Cadre géologique	27
III.4 Tectonique de la région d'étude	29
III.5 Calcaires et travertins	29
III.6 Carte topographique de la carrière	29
III.7 Processus d'extraction du calcaire d'Héliopolis	31
III.8 Conclusion	33
Chapitre IV: Influence de la structure du massif rocheux et de la technique du tir sur les résultats de l'abattage cas de la carrière d'Héliopolis, Guelma	34
IV.1 Etude de l'influence de la maille de forage sur la qualité de la fragmentation	34
IV.1.1 Introduction	34
IV.1.2 Maille carrée	34
IV.1.3 Maille rectangulaire	37
IV.1.4 Interprétation des résultats	39
IV.2 Étude et analyse de la granulométrie du calcaire fragmenté provenant de la carrière de granulats d'Héliopolis	39
IV.2.1 Analyse de la granulométrie des roches fragmentées à l'aide du modèle Kuz-Ram	40
IV.2.2 Calcul des paramètres du plan de tir proposé par la méthode de Langefors	42
IV.2.3 Caractéristiques des explosifs utilisés dans les explosions étudiées	46
IV.2.3.1 Densité de l'explosif utilisé	46
IV.2.3.2 La puissance relative de l'explosif	47
IV.2.3.3 Vitesse de détonation nominale de l'explosif	47
IV.2.4 Etude de l'influence des caractéristiques d'explosif sur la qualité de la fragmentation	48
IV.2.4.1 La densité de l'explosif	48
IV.2.4.2 La puissance relative de l'explosif	49
IV.2.4.3 Vitesse de détonation nominale de l'explosif	50
IV.2.4.4 Résultats et discussion	53
IV.3 Conclusion	55

Conclusion Générale	57
Références	58
Annexes	65

Dédicace

À mes chers parents, À mon époux bien-aimé,

Votre amour, votre soutien et vos sacrifices ont été les piliers sur lesquels s'est construit mon parcours. Chaque page de cette thèse porte l'empreinte de vos valeurs, de votre force et de votre présence indélébile dans mon cœur.

Cette thèse est le fruit d'un parcours façonné par l'amour, le soutien et les valeurs que vous m'avez inculquées. À vous qui n'êtes plus là, votre présence demeure vivante en moi, dans chaque pensée, chaque effort, chaque réussite. Votre souvenir est une lumière qui éclaire mon chemin.

Bien que vous ne soyez plus à mes côtés, votre souvenir éclaire mon chemin, me guide et m'inspire à persévérer.

Que cet humble travail soit le reflet de tout ce que vous m'avez donné et le témoignage de mon amour éternel pour vous.

À vous, mes enfants, qui êtes ma force et ma plus belle raison d'avancer. Votre amour et votre présence remplissent ma vie d'une énergie inestimable. Que ce travail soit le témoignage de mon engagement, de ma persévérance et d'un exemple que je souhaite vous transmettre : celui de croire en ses rêves et de toujours aller de l'avant.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude. Tout d'abord, à Dieu le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste projet.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus cordiaux à mon directeur de thèse, le Professeur Hafsaoui Abdellah, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de cette recherche. Sa guidance m'a été d'une grande aide.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance au Professeur IDRES Abdelaziz, qui m'a soutenu et encouragé depuis le début jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Son appui a été fondamental.

Mes vifs remerciements vont au Professeur Berdoudi Said, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je suis aussi profondément reconnaissante envers les membres du jury, les Professeurs Kimour Mohamed, Yahyaoui Sami, Saadoun Abderrazak, Fredj Mohamed, qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail, tout en enrichissant le débat par leurs observations pertinentes.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

Enfin, je ne peux clore ces remerciements sans évoquer la patience et les encouragements de mes enfants. Leur soutien et leurs sacrifices ont été une source de motivation précieuse tout au long de mes études.

Abstract

This study focuses on the factors that influence blasting results in the Heliopolis limestone quarry, Guelma. Fragmentation quality is a major problem in this quarry because it directly affects productivity and production costs

The objective of this study is to determine the essential factors which directly influence the results obtained after the blasting work carried out in the Heliopolis limestone quarry and to propose solutions to improve blasting performance

To address this issue, we used the Kuz-Ram model to analyze the particle size distribution of fragments from three blasting plans conducted at the study quarry. This allowed us to consider the effect of blasting plan parameters on the quality of limestone fragmentation from the Héliopolis quarry. A new blasting plan is proposed using the Langefors method to determine the optimal blasting parameters. The results obtained were compared to those of the previous blasts

The best research results are obtained when optimal rock fragmentation by explosives in the Heliopolis limestone quarry reaches 89.2%, with a balance between fine particles (5.7%) and oversized blocks (5.1%). This fragmentation is therefore highly dependent on the quality and quantity of explosive used, the distance between drill holes and rows, the type of blasting, the connection pattern, and cracking caused by shock waves (back-effects)

In conclusion, our study shows that the quality of fragmentation in the Heliopolis limestone quarry can be improved by adjusting blasting parameters and taking into account the geological and mechanical properties of the rock. The results of this study can be used to optimize blasting operations and improve productivity and production costs

Keywords: Rock mass, discontinuity, Kuz-Ram, Fragmentation, Explosive, Langefors

Résumé

Cette étude porte sur les facteurs qui influent sur les résultats de tir dans la carrière de calcaire d'Héliopolis, Guelma. La qualité de fragmentation est un problème majeur dans cette carrière car elle affecte directement la productivité et les coûts de production.

L'objectif de cette étude est de déterminer les facteurs essentiels qui influent directement les résultats obtenus après les travaux de tir réalisés dans la carrière de calcaire d'Héliopolis et de proposer des solutions pour améliorer les performances d'abattage.

Pour résoudre ce problème, Nous avons utilisé le modèle de Kuz-Ram pour analyser la granulométrie des fragments de trois plans de tir réalisés au niveau de la carrière d'étude pour considérer l'effet des paramètres du plan de tir sur la qualité de la fragmentation de calcaire de la carrière d'Héliopolis. Un nouveau plan de tir est proposé en utilisant la méthode de Langefors pour déterminer les paramètres de tir optimaux. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux des tirs précédents.

Les meilleurs résultats de la recherche sont obtenus lorsque la fragmentation optimale des roches par explosif dans la carrière de calcaire d'Héliopolis atteint 89,2 % avec un équilibre entre les particules fines de 5,7 % et les blocs surdimensionnés de 5,1 %. De ce fait, cette fragmentation dépend fortement la qualité et la quantité d'explosif utilisée, la distance entre les trous de forage et les rangées, le type d'amorçage, le schéma de connexion et des fissures provoquées par les ondes de choc (effets arrière).

En conclusion, notre étude montre que la qualité de fragmentation dans la carrière de calcaire d'Héliopolis peut être améliorée en ajustant les paramètres de tir et en prenant en compte les propriétés géologiques et mécaniques de la roche. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour optimiser les opérations de tir et améliorer la productivité et les coûts de production.

Mots clés : Massif rocheux, discontinuité, Kuz-Ram, Fragmentation, Explosif, Langefors

ملخص

تركز هذه الدراسة على العوامل المؤثرة في نتائج التفجير في محجر الحجر الجيري في هليوبوليس، قالمة. وتُعد جودة التفجير مسألة بالغة الأهمية في هذا المحجر، إذ تؤثر بشكل مباشر على الإنتاجية وتكاليف الإنتاج.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد العوامل الرئيسية التي تؤثر بشكل مباشر على النتائج التي تم الحصول عليها بعد عمليات التفجير التي أجريت في محجر الحجر الجيري في هليوبوليس، واقتراح حلول لتحسين أداء التفجير.

لمعالجة هذه المشكلة، استخدمنا نموذج Kuz-Ram لتحليل توزيع حجم الصخور الناتجة عن ثلاث خطط تفجير نُفذت في المحجر المدروس. وقد مكّننا ذلك من دراسة تأثير معايير خطة التفجير على جودة تفتيت الحجر الجيري من محجر هليوبوليس. واقترحنا خطة تفجير جديدة باستخدام طريقة Langefors لتحديد معايير التفجير المثلى. وقارنا النتائج التي تم الحصول عليها بنتائج التفجيرات السابقة.

تُحقق أفضل نتائج البحث عندما تصل نسبة التفتيت الأمثل للصخور بواسطة المتفجرات في محجر الحجر الجيري في هليوبوليس إلى 89.2%، مع توازن بين الجزيئات الصغيرة (5.7%) والصخور الكبيرة (5.1%). ولذلك، يعتمد هذا التفتيت بشكل كبير على نوعية وكمية المتفجرات المستخدمة، والمسافة بين ثقوب الحفر والصفوف، ونوع التفجير، ونمط الربط، والتشققات الناتجة عن الموجات الصدمية (الأثار الجانبية).

في الختام، تُظهر دراستنا أن جودة التفتيت في محجر الحجر الجيري في هليوبوليس يُمكن تحسينها من خلال تعديل معايير التفجير ومراعاة الخصائص الجيولوجية والميكانيكية للصخور. ويمكن الاستفادة من نتائج هذه الدراسة في تحسين عمليات التفجير ورفع الإنتاجية وخفض تكاليف الإنتاج.

الكلمات المفتاحية: كتلة صخرية، عدم استمرارية، Kuz-Ram ، تفتت، انفجاري، Langefors

Liste des figures

N°	Titres	Page
Fig. I.1. a)	Onde de contrainte générée par un détonateur placé au fond du trou de mine.	3
b)	Superposition d'ondes de contrainte générées par un détonateur placé au milieu de la colonne explosive	
Fig. I.2.	Destruction de roches par tir	6
Fig. I.3.	Vue schématique illustrant la formation de la zone de cisaillement	8
Fig. I.4.	Vue schématique illustrant la formation de la zone de fissuration	9
Fig. I.5.	Vue schématique illustrant la formation de la ligne de moindre résistance	9
Fig. I.6.	Illustrations des différentes formes de la maille de forage	10
Fig. I.7.	Illustration des différentes zones affectées par l'effet de l'explosif	10
Fig. I.8a.	Représentation schématique du tir avec pendage	12
Fig. I.8b.	Représentation schématique du tir contre le pendage	12
Fig. I.8c.	Représentation schématique du tir le long de la direction	13
Fig. I.9.	Effet des discontinuités sur la fragmentation	14
Fig. I.10.	Expériences sur modèles de plaques de verre réalisées par Seinov et Chevkin	15
Fig. II.1.	Paramètres pris en compte dans les opérations d'abattage à l'explosif	17
Fig. III.1.	Localisation géographique de la zone d'étude	27
Fig. III.2.	Les formations autochtones des séries néritiques constantinoises de la région de Guelma	28
Fig. III.3.	Carte topographique de la carrière de calcaire – Héliopolis	30
Fig. III.4.	Différents types de discontinuités dans la masse rocheuse de la carrière d'Héliopolis, a – joints stratigraphiques, b – joints, c – karsts, d – failles	30
Fig. III.5.	Vue ensemble de la carrière du calcaire d'Héliopolis	31
Fig. IV.1.	Courbes obtenues de la distribution granulométrique dans le cas d'utilisation de la maille carrée	35
Fig. IV.2.	Courbes représentant les valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenues lors de l'utilisation de la maille carrée	36
Fig. IV.3.	Courbes obtenues représentant les valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille carrée	37
Fig. IV.4.	Courbes représentant les valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenues lors de l'utilisation de la maille rectangulaire	38

Fig. IV.5.	Zone non régulée excessivement fissurée	41
Fig. IV.6.	Schéma de la troisième opération de tir avec explosif : 0 – Détonateur électrique instantané ; A – Exploseur ; B – Fil électrique ; C – Cordeau détonant ; E – Espacement ; 1–12 – Détonateur à microretard = 20 ms	41
Fig. IV.7.	Schéma du plan de tir proposé	45
Fig. IV.8.	Distribution granulométrique en fonction de la densité de l'explosif	49
Fig. IV.9.	Distribution granulométrique en fonction de la puissance relative de l'explosif	50
Fig. IV.10.	Distribution granulométrique en fonction de la vitesse de détonation nominale de l'explosif	51
Fig. IV.11.	Roches fragmentées après chaque opération de tir (a – première opération ; b – deuxième opération ; c – troisième opération ; d – plan de tir proposé).	51
Fig. IV.12.	Courbes obtenues de la distribution granulométrique après les opérations de tir (1 – premier tir ; 2 – deuxième tir ; 3a et 3b – troisième tir ; 4 – tir proposé)	52
Fig. IV.13.	Fissures créées après le tir (effets arrière)	54
Fig. IV.14.	Séquence d'initiation proposée pour la troisième opération de tir (0 – Détonateur électrique instantané ; A – Exploseur ; B – Fil électrique ; C – Cordeau détonant ; E – Espacement ; 1–12 – Détonateur à microretard = 20 ms)	55

Liste des Tableaux

N°	Titres	Page
Tableau. III.1.	Les caractéristiques du calcaire de la carrière d'Héliopolis.	31
Tableau. III.2.	Caractéristiques techniques des explosifs utilisés dans la carrière du calcaire d'Héliopolis	33
Tableau. IV.1.	Valeurs cibles et prévues de fragmentation de la roche obtenues dans le cas d'utilisation de la maille carrée	35
Tableau. IV.2.	Valeurs de coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille carrée	36
Tableau. IV.3.	Valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenue dans le cas d'utilisation d'une maille rectangulaire	38
Tableau. IV.4.	Valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille rectangulaire	39
Tableau. IV.5.	Correction de la banquette maximale en fonction de diamètres du trou	42
Tableau. IV.6.	Correction de la banquette maximale en fonction de la résistance au tirage	43
Tableau. IV.7.	Récapitulatif des paramètres des plans de tir existants et proposé.	45
Tableau. IV.8.	Pourcentages des explosifs utilisés dans la carrière de granulats d'Héliopolis.	47
Tableau. IV.9.	Récapitulatif des valeurs des caractéristiques des explosifs utilisés	48
Tableau. IV.10.	Récapitulatif des valeurs de la densité et de la distribution granulométrique obtenue après le tir	48
Tableau. IV.11.	Récapitulatif des valeurs de la puissance relative de l'explosif et de la distribution granulométrique obtenue après le tir	49
Tableau. IV.12.	Récapitulatif des valeurs de la vitesse de détonation nominale de l'explosif et de la distribution granulométrique obtenue après le tir	50
Tableau. IV.13.	Valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenues après les opérations de tir étudiées et l'opération de tir proposée (B-4)	52
Tableau. IV.14.	Paramètres de fragmentation de la roche obtenue après les opérations de tir étudiées et l'opération de tir proposée (B-4)	52

Introduction générale

La fragmentation des roches est une notion complexe dans le contexte de l'exploitation des carrières. L'opération de tir est donc le premier processus de réduction granulométrique, et joue un rôle particulièrement important en exploitation minière, un abattage bien planifié permet de limiter le travail de désagrégation secondaire des blocs hors gabarit qui peuvent être générés par le tir, et d'améliorer les conditions de travail des autres opérations en aval telles que le chargement, le transport, le concassage et le broyage [1]. L'amélioration de la fragmentation des roches tirées nécessite l'étude et l'analyse des facteurs influençant la distribution granulométrique après les explosions réalisées, qui peuvent être classés en trois catégories : les propriétés du massif rocheux, les paramètres géométriques du plan de tir et le type des explosifs chargés dans les trous forés [2].

La plupart des recherches sont orientées vers l'étude de l'influence des caractéristiques du massif rocheux sur les résultats du tir minier. La propagation des ondes de choc induites durant le travail d'explosif change de manière significative au niveau des discontinuités rocheuses et des massifs rocheux profonds [3]. La persistance de la discontinuité et la distribution spatiale des ponts rocheux ont une influence significative sur l'évolution des dommages induits par le tir [4]. La fissuration de la masse commence à partir de la discontinuité immédiatement après la détonation dans le cas des discontinuités inclinées. Cependant, pour les discontinuités horizontales et verticales, les fissures commencent d'abord à partir du trou de forage [5], et plus le pendage entre la discontinuité et l'axe des trous de forage est petit, plus la contrainte dans la roche est importante [6]. La méthode de forage et d'abattage provoque de fines fissures dans la masse rocheuse, ce qui entraîne des problèmes de sécurité et de stabilité [7]. Ensuite, les résultats du tir sont influencés par la présence de discontinuités, par l'hétérogénéité de la masse rocheuse et par la présence de la surface libre, pour assurer une bonne fragmentation, il est important d'avoir une bonne compréhension des effets de ces paramètres sur les résultats obtenus après abattage.

Plusieurs études ont été menées sur l'influence des paramètres contrôlables. L'amélioration des performances de tir dépend principalement de la structure de la charge du trou de mine [8], du type d'explosif et du diamètre du trou [9], de la position du détonateur [10] et du moment d'initiation du tir [11]. Cependant, les paramètres géométriques du tir et les propriétés de l'explosif jouent un rôle important dans la fissuration du massif [12].

L'objectif principal de ce travail est de trouver une méthodologie pour la conception d'un plan de tir permettant la bonne fragmentation des matériaux durs, et d'avoir la corrélation entre les paramètres qui affectent les résultats de l'opération de tir et la distribution granulométrique des roches fragmentées en utilisant la méthode de Langefors et le modèle empirique de Kuz-Ram pour proposer un autre modèle de tir.

Afin d'aborder cette problématique et d'atteindre l'objectif souhaité, nous détaillerons successivement dans cette thèse :

- Le premier chapitre traite de la partie bibliographique et se concentre sur l'étude des paramètres qui influencent la qualité de la fragmentation des roches aux explosifs.

- Le deuxième chapitre est une étude mettant l'accent sur le matériel et l'approche méthodologique qui ont permis de mener à bien l'étude présente dans ce travail.

- Le troisième chapitre présente le contexte général de la région d'étude du point de vue géologique, minier et technologique qui a été établi pour la carrière sur laquelle les travaux de recherche ont été menés.

- Le quatrième chapitre, partie essentielle de cette thèse, est consacré à l'optimisation et à l'analyse des différents résultats obtenus à partir des travaux de tir minier dans la carrière de granulats d'Héliopolis, et à la proposition de solutions pour améliorer les résultats des opérations d'abattage.

La conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus et des recommandations proposées aux ingénieurs de la carrière d'étude.

Chapitre I : Etude bibliographiques sur les paramètres influent la fragmentation des roches à l'explosif

I.1 Introduction

Le contrôle de la fragmentation par une conception efficace du tir, ainsi que son impact sur la productivité, représentent des défis majeurs pour les ingénieurs en charge des tirs. Ces difficultés s'expliquent par une connaissance insuffisante de l'énergie explosive effectivement libérée dans le forage, par des pratiques variables d'initiation dans la conception des tirs et par leurs effets sur les caractéristiques de libération de l'énergie explosive. Ce chapitre examine l'impact des paramètres contrôlables et incontrôlables sur la qualité de la fragmentation des roches.

Le haut degré de mécanisation et l'intégration des systèmes de production dans l'industrie minière imposent à toutes les unités de fonctionner avec la fiabilité et la capacité prévues afin de garantir l'atteinte des objectifs de production fixés [13].

L'objectif d'un ingénieur de tir dans une mine est de produire un tas de déblais avec une distribution granulométrique optimale, permettant de charger, transporter et broyer efficacement les roches [14].

Spathis a examiné divers aspects de la réduction de taille et son impact sur la libération des minéraux, en se concentrant principalement sur la prédiction et l'évaluation de la distribution granulométrique après le tir. [15]

Pour obtenir des résultats irréprochables, nous examinerons les facteurs qui influencent les résultats du dynamitage dans ce chapitre.

I.2 Facteurs contrôlables

Dans la plupart des opérations minières, la roche subit plusieurs processus avant de devenir un produit commercial [16]. Lors de la conception d'un tir, la géométrie joue un rôle crucial : elle inclut la forme et la taille des charges, le volume qui leur est attribué, la position et l'étendue des surfaces libres, ainsi que la disposition des charges par rapport à ce volume. Par ailleurs, la quantité et le type d'explosif, ainsi que la séquence d'initiation, revêtent une importance majeure. Tous ces paramètres doivent être définis de manière à atteindre l'effet souhaité, tout en limitant autant que possible les effets secondaires [17].

I.2.1 Mécanisme de la fragmentation par explosif

Le processus général de fragmentation des roches à l'aide d'explosifs est désormais bien maîtrisé par les spécialistes du monde entier. Il peut être résumé par une succession de phénomènes : la décomposition de la matière explosive en gaz à haute pression et à haute température, la propagation d'ondes de contrainte dans le massif rocheux, la rupture ou l'endommagement de la roche, la détente des gaz à travers les zones de fragilité nouvellement créées, ce qui ouvre nettement des fissures, et enfin, la mise en mouvement et l'éjection des fragments de matériaux. Chaque phase est rappelée afin de mieux comprendre l'ensemble du phénomène. [18]

I.2.2 La position du détonateur

Des études théoriques et pratiques ont démontré que la position du détonateur joue un rôle crucial dans la fragmentation de la roche. Il a été constaté que placer le détonateur au milieu de la colonne explosive améliore significativement la fragmentation de la roche. [19] [20]

I.2.2.1 Temps de détonation

Le temps de détonation (T_D) est généralement mesuré en millisecondes (ms) ou en microsecondes (μ s), il dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La vitesse nominale de détonation (VOD) de l'explosif,
- La position du détonateur dans la colonne de charge,
- La longueur de la charge explosive.

Ces éléments interagissent pour déterminer le délai nécessaire à la détonation complète de la charge explosive, influençant ainsi l'efficacité globale du tir.

$$T_D = \frac{L_{max}}{VOD}$$

Où

L_{max} peut être : (1) la distance maximale entre un détonateur et l'extrémité de la colonne explosive, ou (2) dans le cas d'un système à double détonateur, elle peut être la distance entre les détonateurs divisée par deux si le résultat est supérieur à 1.

Un temps de détonation plus court signifie que l'énergie totale de l'explosif est libérée plus rapidement dans la masse rocheuse. Une concentration d'énergie plus élevée et une répartition plus uniforme des contraintes devraient être meilleures pour la fragmentation de la roche. Dans un système à détonateur unique, le temps de détonation peut être réduit de moitié en déplaçant un détonateur du bas ou du haut vers le milieu de la colonne explosive. Dans un système à double détonateur, le temps de détonation peut être encore réduit de moitié en plaçant les détonateurs aux positions optimales. [21] [22]

I.2.2.2 Taux de chargement

La taille des fragments diminue à mesure que le taux de chargement augmente. Le taux de chargement ($d\sigma/dT_D$) peut être accru en réduisant le temps de détonation (T_D). Par conséquent, en positionnant le ou les détonateurs de manière optimale, il est possible d'augmenter le taux de chargement. De plus, l'énergie cinétique des fragments projetés s'accroît avec l'augmentation du taux de chargement. [22] [23]

I.2.2.3 Superposition d'ondes de contrainte

La superposition d'ondes de contrainte se produit lorsque deux ondes de contrainte distinctes se chevauchent. Si ces ondes ont le même signe (toutes deux compressives ou toutes deux en traction), elles s'additionnent directement, entraînant une contrainte accrue.

En plaçant un détonateur au milieu d'une colonne explosive, les détonations se propagent vers le haut et vers le bas créent chacune des ondes de contrainte distinctes. Lorsque ces deux fronts de détonation se chevauchent à une certaine distance du trou de mine, l'amplitude maximale de la contrainte augmente. Cette amplitude accrue des contraintes dans la masse rocheuse environnante influence considérablement la fracture et la fragmentation des roches. La figure I.1a illustre une onde de contrainte unique générée par un détonateur situé au fond du trou de mine, tandis que la figure I.1b montre la superposition des ondes de contrainte lorsque le détonateur est placé au centre de la colonne explosive [22].

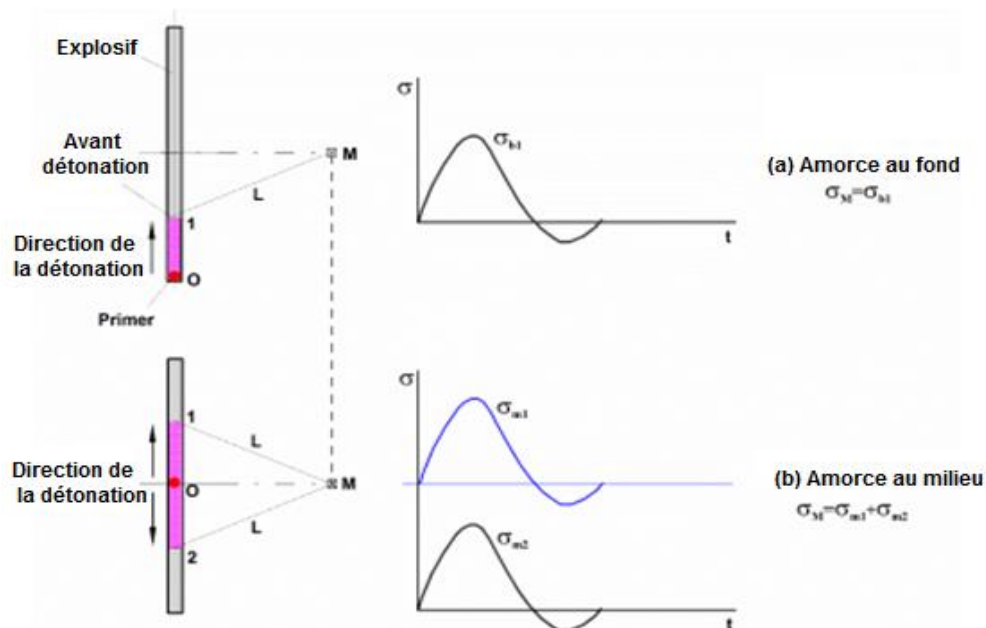


Fig. I.1. a) Onde de contrainte générée par un détonateur placé au fond du trou de mine. b) Superposition d'ondes de contrainte générées par un détonateur placé au milieu de la colonne explosive [22].

I.2.3 Longueur du trou

La longueur du trou dépend principalement la hauteur du gradin, l'inclinaison et la longueur d'excès. Elle joue un rôle essentiel dans la détermination de la distribution de l'énergie dans le volume à abattre. Cependant, il est souvent difficile d'obtenir une distribution idéale de la charge pour les trous longs [24].

I.2.4 Diamètre du trou

En étudiant les principaux paramètres de tir, Dremin a établi qu'à n'importe quel diamètre de charge, une augmentation de la densité de l'explosif (ρ), de 1,0 à 1,45 g/cm³, conduit à une augmentation significative de la vitesse de détonation [22]. Bhandari et Lowrie ont déterminé que les propriétés de détonation des explosifs industriels sont liées au diamètre du trou de mine chargé ainsi qu'à la densité de l'explosif, qui influence la pression exercée par les produits de détonation dans le trou de mine. [26] [27]

I.2.5 Longueur de bourrage

La fonction principale du bourrage est de conserver l'énergie explosive dans un trou de mine et de réduire la perte d'énergie de l'explosif. Afin d'éviter ou de minimiser cette perte, la longueur de bourrage doit être adéquate [22].

I.2.6 Excès de forage (sous-foration)

L'excès de forage a pour but d'augmenter l'efficacité du tir dans la partie inférieure du gradin et de garantir une bonne destruction des roches au niveau du pied du gradin, en créant les conditions nécessaires au travail normal des engins de chargement. La longueur de la surforation dépend de divers facteurs, tels que la hauteur du gradin, le diamètre du trou, les propriétés de l'explosif, ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques des roches, etc. [28].

I.2.7 La banquette

La banquette correspond à la distance entre la première rangée de trous et la surface libre verticale du talus du gradin. Si cette distance est trop grande, seules des fissures apparaîtront dans la masse rocheuse. En revanche, si elle est trop réduite, les gaz s'échapperont vers la surface du gradin à très grande vitesse, projetant violemment les fragments de roche proches de la face dans les airs. Ces projections peuvent être désastreuses, voire mortelles, dans de nombreux cas [29] [30].

I.2.8 Rapport banquette/diamètre du trou

Le diamètre du trou et la banquette sont deux paramètres essentiels dans la conception des tirs. La taille moyenne des fragments diminue à mesure que le rapport banquette/diamètre du trou diminue. Cependant, certaines données ne reflètent pas la tendance attendue, probablement en raison de l'influence de la géologie sur la fragmentation du tir. En règle générale, les trous de petit diamètre, accompagnés de charges plus faibles, produisent des fragments de plus petite taille [31].

I.2.9 Rapport espacement/banquette

L'espacement et la banquette sont des paramètres cruciaux ayant un impact direct sur la fragmentation de la roche dans la conception des tirs. Une charge excessive génère une résistance à la pénétration des gaz d'explosion dans les fractures et au déplacement de la roche, tout en produisant un niveau de vibration excessif. En revanche, une banquette trop faible permet aux gaz de s'échapper, projetant de manière incontrôlable la roche fragmentée à grande vitesse.

Un espacement excessif entraîne une fracturation inadéquate entre les trous de mine, provoquant des faces irrégulières et des problèmes au pied du gradin. Si la banquette n'est pas correctement ajustée à l'espacement, les trous de mine ne se connecteront pas, ce qui entraînera une utilisation inefficace de l'énergie explosive.

En général, le rapport espacement/banquette varie entre 1 et 2. Cependant, le rapport optimal a été déterminé à 1,15 pour un motif décalé et à 1,25 pour un motif rectangulaire [32]; Un rapport espacement/banquette compris entre 1,1 et 1,3 a montré d'excellents résultats de

tir, à l'exception de certaines explosions présentant un faible indice d'uniformité (n) en raison de la présence de fissures [31].

I.2.10 Facteur de poudre

Le facteur de poudre représente le rapport entre la quantité de roche brisée et le poids total de l'explosif utilisé. Il s'agit d'un paramètre essentiel dans la conception des tirs, ayant une influence significative sur la fragmentation obtenue. Un facteur de poudre élevé provoque des fragments hors gabarit, tandis qu'un facteur de poudre faible entraîne un concassage excessif de la roche.

I.2.11 Rapport hauteur du gradin/banquette

Le rapport entre la hauteur du gradin et la banquette, influence également la fragmentation obtenue. Bien que la hauteur du gradin soit généralement déterminée en fonction des spécifications liées à l'utilisation de l'équipement de chargement, elle doit également être adéquate pour garantir des paramètres optimaux tels que la banquette, l'espacement et le facteur de poudre [33].

Un changement dans la banquette ou l'espacement a un impact significatif sur la fragmentation de la roche. Lorsque la rigidité atteint une valeur élevée, il devient plus facile de déplacer et de déformer la roche, notamment au centre du gradin [34]. Toutefois, cela peut également entraîner des problèmes, tels que la déviation des trous de mine [31].

I.2.12 Déformation de la roche par explosif

La théorie initiale du mécanisme de destruction de la roche par l'énergie de l'explosif a été proposée par Lomonosov, qui fut le premier à déterminer les principaux paramètres des explosifs. Par la suite, le problème de la destruction de la roche par explosif a été étudié par les chercheurs russes Vlasov, Drukovannyi, Kutuzov, Melnikov, Pokrovskiy et Khanukaev. Les travaux de ces chercheurs, ainsi que d'autres, ont abouti au développement de nombreuses théories et connaissances fondamentales concernant le mécanisme de destruction de la roche par explosif. [35], [36]

La plupart des chercheurs caractérisent le tir comme une oxydation chimique extrêmement rapide, accompagnée d'un dégagement important de chaleur, entraînant la transformation de l'explosif en gaz. Le tir est déclenché par l'action d'une source externe, appelée initiateur. La propagation du tir dans l'explosif à partir du point d'initiation est désignée sous le nom de détonation. La limite entre la zone encore non affectée par le tir et la zone où l'explosif est partiellement transformé en gaz est appelée le front de détonation (Figure I.2a).

Dans la roche proche du trou de mine, les ondes de choc créent une zone de cisaillement (ou zone de compression), où se produit une fragmentation fine et intense de la roche. À mesure que l'on s'éloigne du centre du trou, ces ondes de choc s'atténuent et se propagent dans la zone de fissuration (Figure I.2a, b). Examinons plus en détail certains de ces processus.

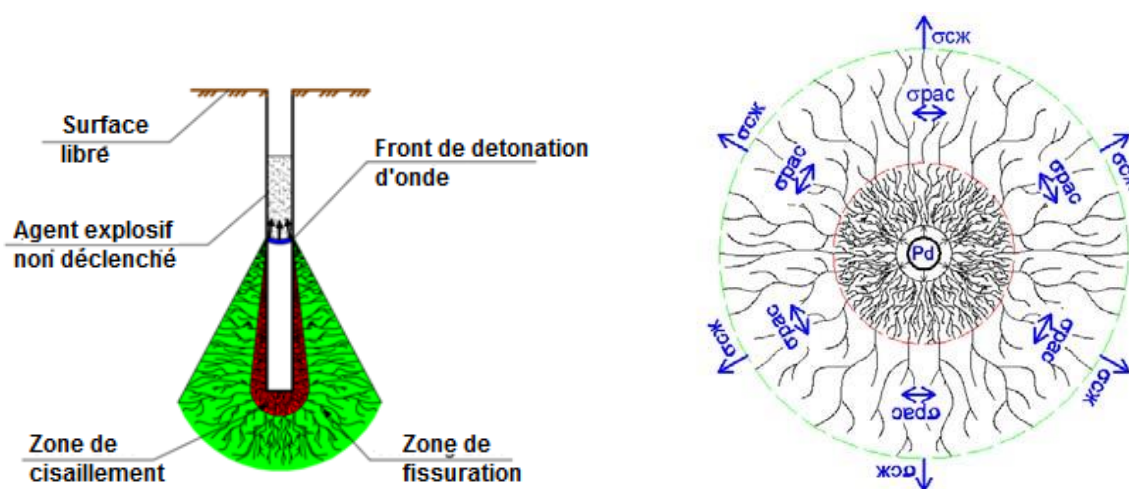


Fig. 1.2. Destruction de roches par tir. [35]

La détonation est une réaction chimique extrêmement rapide, exothermique et auto-entretenu. Elle s'accompagne, en un temps très court, d'un dégagement d'un grand volume de gaz chauds couplé à une onde de choc.

Les progrès récents réalisés dans le domaine de la fabrication des explosifs, ainsi que l'évolution de la législation, ont permis à « l'art du minage » de passer rapidement d'un domaine quasi empirique à une discipline scientifique.

Cette technologie évolue constamment vers des solutions générant moins de bruit et de vibrations, tout en offrant une meilleure "blocométrie" et une gestion optimisée des carrières.

La détonation est une onde de choc et de combustion supersonique par rapport au milieu dans lequel elle se propage [37]. Elle décompose l'explosif initial en produits de détonation gazeux et condensés.

La vitesse de détonation d'un explosif donné n'est pas constante ; elle dépend de plusieurs paramètres, notamment de son rayon de courbure [38], et de la densité de l'explosif.

I.2.13 Généralités sur les explosifs

Un explosif s'agit d'un assemblage d'atomes oxydants et réducteurs séparés les uns des autres. Les atomes réducteurs peuvent inclure le carbone, l'hydrogène ou le soufre, tandis que les atomes oxydants sont principalement constitués d'oxygène ou d'halogènes tels que le fluor ou le chlore.

Une substance explosive est caractérisée par sa capacité à propager des réactions de combustion de façon autonome. Deux régimes de combustion principaux existent : la déflagration et la détonation. La déflagration correspond à une transformation quasi isobare se propageant à une vitesse subsonique dans le milieu réactif, tandis que la détonation se manifeste sous la forme d'une onde de choc réactive se déplaçant à une vitesse supersonique par rapport à l'explosif. [39]

Contrairement à la déflagration, la détonation entraîne une augmentation significative de la pression. Dans le cas de la déflagration, les produits de réaction sont accélérés en sens inverse de la propagation du front, alors que dans la détonation, ils sont accélérés dans le même sens que celui de la propagation.

Il est important de noter qu'un explosif peut être solide, liquide, ou sous forme d'un mélange gazeux, tel que le mélange hydrogène/oxygène. Cela constitue une première classification des explosifs basée sur leur état physique. Cependant, il est également possible de classer les explosifs selon d'autres critères, dont quelques exemples seront présentés par la suite. [39]

1.2.13.1 Classification des explosifs

Les explosifs peuvent également être classés en deux types principaux :

Les explosifs primaires, ce sont des substances extrêmement sensibles qui n'ont qu'un seul régime de décomposition, la détonation. Ils explosent très facilement et constituent la principale composante des détonateurs commerciaux, bien qu'une petite quantité d'explosif secondaire puisse y être ajoutée. Les explosifs primaires sont la pierre angulaire des formulations explosives. Ils brûlent ou détonnent lorsqu'ils sont soumis à la chaleur, à une étincelle ou à un choc, et sont fréquemment utilisés dans les dispositifs d'amorçage. Leur décomposition, qui est exothermique, libère de l'énergie utilisée pour provoquer l'explosion d'un explosif secondaire. [40]

Les explosifs secondaires, sont beaucoup plus diversifiés. Ils incluent les compositions explosives telles que le nitrate-fioul ainsi que des corps purs comme la pentrite et le tétyl. Ces explosifs peuvent présenter plusieurs régimes de décomposition : la combustion, la déflagration et la détonation. Il est à noter qu'un passage du régime de combustion au régime de détonation est possible, selon l'environnement du matériau explosif.

La fragmentation par explosifs, essentielle dans l'abattage de roches dépend les caractéristiques des explosifs suivants :

- **Vitesse de Détonation (VOD);** La vitesse de détonation (VOD) est une propriété essentielle des explosifs et permet d'évaluer leurs performances en temps réel. Grâce au développement des systèmes de surveillance des explosions, des systèmes de mesure continue de la VOD sont désormais disponibles. La mesure de la VOD dans les trous de forage facilite la comparaison et l'évaluation des performances relatives des explosifs. [83]

Les explosifs à haute énergie et VOD élevée génèrent une onde de choc plus forte, produisant une meilleure fragmentation des roches dures.

- **Densité de l'Explosif;** La densité est définie comme la masse par unité de volume, exprimée en g/cm^3 . Elle influe sur la sensibilité et les performances de l'explosif. Une augmentation excessive de la densité peut réduire la sensibilité de l'explosif. Si la densité de l'explosif dépasse la densité critique, même une bonne amorce risque de ne pas le faire détoner. Une expression utile de la densité est la densité de chargement,

qui correspond au poids de l'explosif par unité de longueur de trou. Cela permet de déterminer le poids d'explosif chargé par mètre linéaire du trou de mine. La densité de la plupart des explosifs varie entre 0,8 et 1,35 g/cm³. [84]

- **Diamètre Critique;** Le diamètre critique d'un explosif est le diamètre minimal en dessous duquel une détonation stable ne peut pas se propager. Il dépend fortement la nature de l'explosif, de sa densité et de sa granulométrie. [85]
- **Facteur d'Énergie;** Mesure la quantité d'énergie par unité de volume de roche (MJ/m³), essentielle pour contrôler la granulométrie. [86]
- **Résistance à l'Eau;** Capacité de l'explosif à ne pas perdre sa sensibilité dans des trous humides (ex: les bouillies sont plus résistantes que l'ANFO). [87]

I.2.13.2 Travail de l'explosif

La pression des produits de détonation dans le trou de mine, ainsi que les réactions chimiques, sont initiées par l'impulsion d'explosion (par exemple, la charge détonante). Ces réactions chimiques se produisent après l'onde de détonation, moment où l'explosif passe de son état initial aux produits finaux de décomposition. Il est bien établi que la décomposition explosive d'un explosif s'accompagne d'une libération massive de chaleur et de gaz. La pression créée par cette réaction chimique dans le trou de mine entraîne la destruction du massif rocheux. [41], [42]

Ainsi, la détermination précise de la pression des produits de détonation dans le trou de mine est devenue une priorité essentielle pour évaluer l'efficacité du tir et anticiper les résultats des travaux d'abattage dans l'exploitation minière moderne.

- **La zone de cisaillement;** Après les processus décrits précédemment, une destruction directe du massif rocheux se produit, débutant par une défragmentation fine de la roche dans ce que l'on appelle la zone de cisaillement (Fig. I.3).

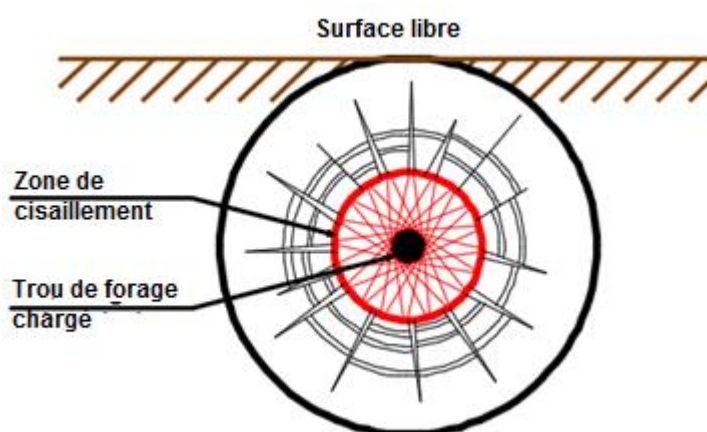


Fig. I.3. Vue schématique illustrant la formation de la zone de cisaillement. [45]

Contrairement à la vitesse de détonation, la zone de cisaillement est difficilement mesurable par des instruments. Une détermination précise de cette zone lors du tir permet

d'estimer de manière fiable l'étendue de la zone de fissuration. Cela contribue, en retour, à optimiser les calculs des paramètres des opérations de forage et de tir.

- **Zone de fissuration** ; Par la suite, la destruction de la roche s'intensifie progressivement, initiant ainsi la formation d'une zone de fissuration (Fig. I.4).

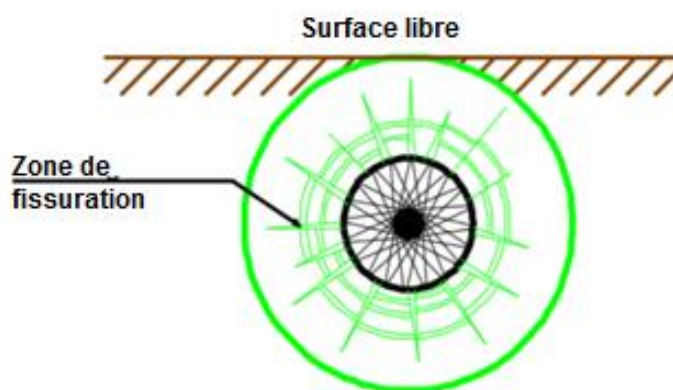


Fig. I.4. Vue schématique illustrant la formation de la zone de fissuration. [45]

Iverson et al. ont élaboré une procédure basée sur la détection et l'application de la zone de destruction réelle [43]. De leur côté, Kutuzov et Andrievskiy, procèdent en déterminant successivement la zone de cisaillement, puis la zone de fissuration. Enfin, la disposition des trous de mine sur la surface de la face est définie à partir de calculs utilisant les valeurs finales de ces zones. [44]

I.2.14 Ligne de moindre résistance

La ligne de moindre résistance (LLR) correspond à la distance minimale entre le centre de charge et la surface libre (Fig. I.5) [45]. Il est désormais établi que cette distance dépend du type d'explosif utilisé, des propriétés du massif rocheux détruit, du diamètre du trou de mine chargé, ainsi que du degré de chargement.

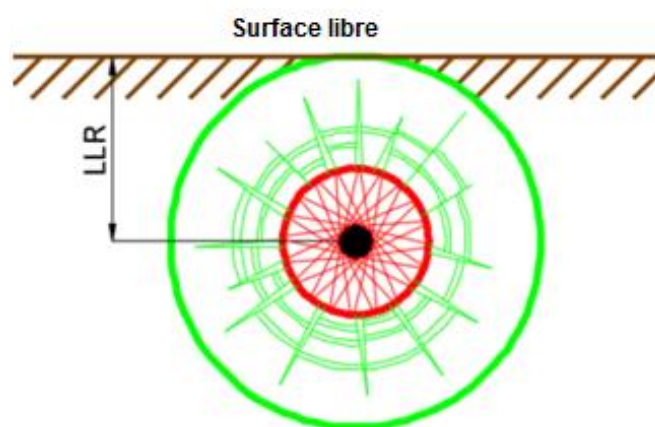


Fig. I.5. Vue schématique illustrant la formation de la ligne de moindre résistance [45].

I.2.15 La maille de forage

L'implantation des trous sur la surface du gradin peut adopter différentes mailles : carrée, rectangulaire ou triangulaire. [46]

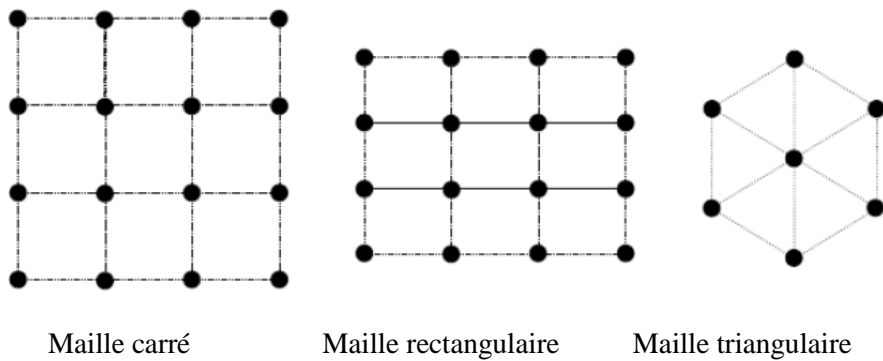


Fig. I.6. Illustrations des différentes formes de la maille de forage. [46]

Après la détonation de la charge, la zone de fissuration autour d'un trou de mine est circulaire. Si les zones de fissuration de deux trous de mine adjacents se chevauchent, la partie superposée subira une fissuration excessive. En revanche, si un espace existe entre ces zones, cela entraînera la formation de gros blocs de roche. Ces deux situations sont indésirables.

Les dimensions du carré sur lequel les trous sont positionnés engendrent à la fois une zone de fragmentation excessive et une zone de non-fragmentation. Lorsque les trous de mine sont rapprochés, la zone de non-fragmentation se réduit et finit par disparaître si la longueur du côté du carré atteint une certaine valeur spécifique. Cependant, cela entraîne simultanément une augmentation de la zone de fragmentation excessive. Des observations similaires s'appliquent également dans le cas d'un modèle triangulaire.

Dans la pratique, les mailles carrées et rectangulaires sont les plus couramment utilisées. Toutefois, pour exploiter le modèle triangulaire, un décalage est souvent appliqué aux positions des trous dans les rangées adjacentes. [47]

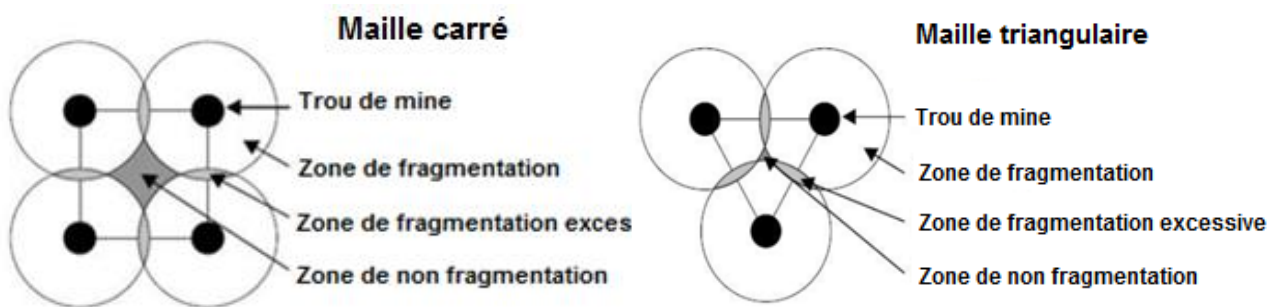


Fig. I.7. Illustration des différentes zones affectées par l'effet de l'explosif. [47]

I.3 facteurs incontrôlables

Les discontinuités constituent une caractéristique inhérente des masses rocheuses et posent des défis spécifiques lors des opérations d'abattage à l'explosif dans les mines et les industries civiles, engendrant des coûts d'excavation élevés. De manière générale, toutes les masses rocheuses réelles présentent diverses discontinuités réparties à travers leur structure. Parmi les types les plus courants figurent les joints, les plans de stratification, la stratification, la foliation et les failles.

Persson, a observé que l'abattage dans un milieu isotrope et homogène ne produit pas le même schéma de fragmentation que dans un milieu traversé de discontinuités. Dans la majorité des matériaux rocheux, des fissures se forment, réduisant ainsi les contraintes générées par l'explosion, en raison des réflexions des ondes de choc. Les fissures radiales provoquées par la charge explosive s'arrêtent efficacement au niveau des discontinuités, lorsque le facteur de concentration des contraintes devient trop faible et que le gaz explosif pénètre dans les fissures existantes. [48]

Les plans de stratification des roches sédimentaires et la foliation des roches métamorphiques peuvent conférer aux matériaux des propriétés dépendantes de la direction de la charge. L'évolution des contraintes dans le temps au sein des roches sédimentaires, apparemment homogènes, et les différences entre les contraintes principales peuvent sensiblement modifier le schéma de fracture induit par l'explosion et, par conséquent, influencer la fragmentation.

Singh, indique que les formations rocheuses comportent souvent des plans de stratification et des joints. Ces formations articulées posent un problème majeur pour l'industrie minière, car elles réduisent non seulement la productivité, mais elles représentent également un risque important pour la sécurité. Pour limiter les dommages provoqués par l'abattage à l'explosif, il est crucial de comprendre l'influence des joints sur les résultats du tir. [49]

I.3.1 Caractéristiques de la masse rocheuse

Scoble, a constaté que, lors de la conception d'un tir, la masse rocheuse est souvent considérée comme homogène. Cependant, en réalité, elle comporte des caractéristiques telles que des joints et d'autres discontinuités, qui ont un impact significatif sur les résultats du tir. Pour obtenir des résultats satisfaisants, il est essentiel de bien comprendre l'influence de ces caractéristiques sur les performances du tir. [50]

I.3.2 Orientation des discontinuités

Selon les expériences menées par Worsey, les résultats du tir contrôlé dépendent fortement de l'angle formé entre la ligne de périmètre prévue et les discontinuités. Lorsque cet angle est inférieur à 60°, les résultats du tir contrôlé sont médiocres. De plus, si l'angle est inférieur à 15°, le tir contrôlé devient inefficace par rapport à un tir classique. [51]

Hustrulid, cité par Burkle, affirme que les résultats du tir sont influencés par l'orientation des structures de la masse rocheuse. Trois cas doivent être considérés [52], [53]:

- a- Le tir dans le sens du pendage,
- b- Le tir à l'encontre du pendage,
- c- Le tir dans la direction de la ligne de pendage.

Lorsque le tir est effectué dans le sens du pendage, le problème de déformation à la base diminue, ce qui améliore l'efficacité du tir (Figure I.8a). Cependant, si le tir est réalisé à l'encontre du pendage, l'efficacité du tir diminue, le problème de la base devient plus prononcé et un profil de tas de déblais très élevé est généré (Fig. I.8b). Enfin, dans le cas où le tir suit la direction de la ligne de pendage (Fig. I.8c), on observe que le talus se forme avec une configuration en dents de scie, en raison de la composition variée des roches.

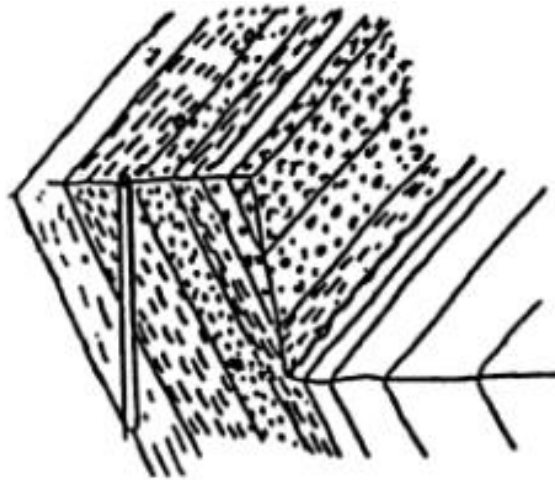


Fig. I.8a. Représentation schématique du tir avec pendage. [54]

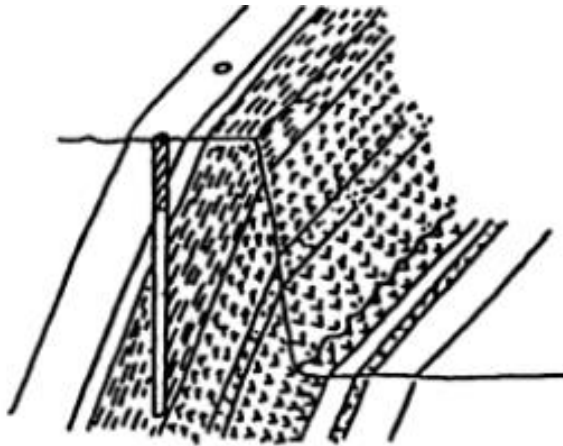


Fig. I.8b. Représentation schématique du tir contre le pendage. [54]

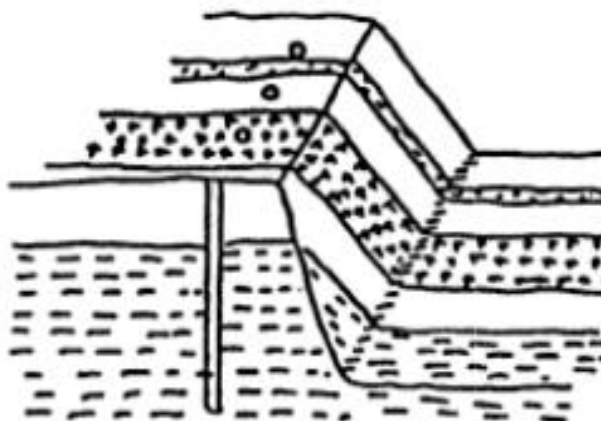


Fig. I.8c. Représentation schématique du tir le long de la direction. [54]

Singh et Xavier, citant Cunningham et Goetzsche, ont indiqué que l'orientation des joints joue un rôle crucial dans la stabilité du périmètre des excavations [54], [55]. Les joints peuvent diminuer (atténuer) l'intensité de l'onde de contrainte induite. Le degré d'atténuation dépend de l'angle d'incidence entre la surface du joint et l'onde traversant ce dernier. Lorsque cet angle est perpendiculaire ou parallèle à la face, l'atténuation est minimale. En revanche, si l'angle se situe entre 15° et 45° , l'atténuation atteint son maximum, [56]

Il est donc suggéré que le contrôle du périmètre est facilité lorsque l'angle entre les joints et la ligne de périmètre est proche du parallèle ou de 90° , car l'atténuation reste minimale. Pour tous les autres angles, une augmentation de l'atténuation entraîne un contrôle du périmètre moins efficace.

Singh et Narendrula, ont étudié la relation entre l'orientation des joints et le contrôle du périmètre. Ils ont utilisé des modèles en béton à haute résistance présentant différentes orientations de joints pour leurs expériences. Les trous de mine associés à des joints orientés à 45° ont donné de mauvais résultats, tandis que pour les joints orientés à 90° par rapport aux trous de mine, les dommages étaient négligeables. [57]

I.3.3 Espacement des plans de joint

L'espacement des joints au sein d'une masse rocheuse exerce une influence significative sur la distribution granulométrique des déblais fragmentés. En général, un espacement réduit des joints contribue à améliorer le niveau de fragmentation. Il est recommandé d'utiliser, dans une masse rocheuse avec un espacement des plans de joint réduit, des explosifs à faible énergie de choc mais à haute énergie de gaz. En revanche, dans le cas d'une masse rocheuse avec un espacement plus large entre les joints, des explosifs offrant une énergie de choc plus élevée et une énergie de gaz moindre seraient préférables pour optimiser la fragmentation. [58]

I.3.4 Fréquence des discontinuités

Lorsque des discontinuités sont présentes, la zone d'influence effective d'un trou de mine diminue. Les espaces entre les joints entravent non seulement la propagation des fissures radiales, mais facilitent également l'échappement des gaz, ce qui réduit la pression dans le

trou de forage (Fig. I.9). En conséquence, la fragmentation et le soulèvement du matériau extrait sont amoindris, [58].

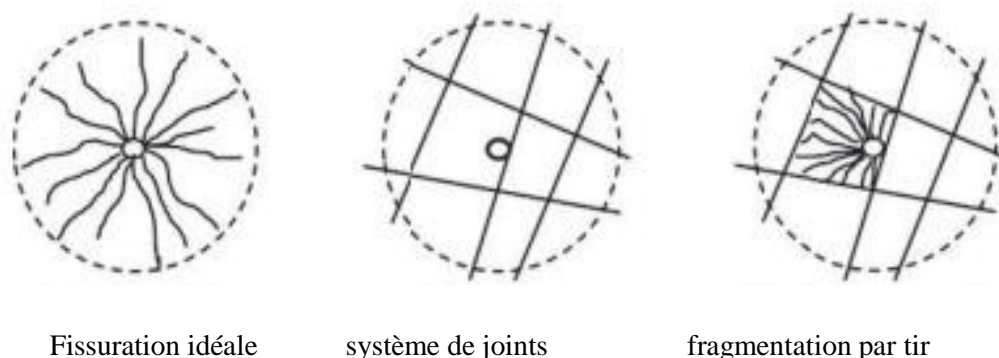


Fig. I.9. Effet des discontinuités sur la fragmentation. [58]

Singh et Xavier, ainsi que Singh et Narendrula, ont souligné que, pour obtenir un profil d'excavation régulier, l'espacement des trous dans le plan de forage doit être inférieur à l'espacement des joints. [54], [57],

I.3.5 Remplissage des joints

Singh et Xavier, ont mené des expériences de tir sur des modèles en béton à petite échelle. Ils ont constaté que la transmission des ondes à travers un joint dépend de sa largeur et du type de matériau de remplissage. Lorsque la largeur du matériau de remplissage est réduite et que son impédance acoustique est proche de celle du milieu environnant, la transmission des ondes est améliorée. Concernant la largeur du joint, il a été observé que, plus elle augmente, plus la perte d'énergie à travers le joint s'intensifie, en particulier lorsque ce dernier est situé à proximité du front de taille. [54]

Les joints remplis de matériau argileux génèrent fréquemment un profil d'excavation irrégulier, en raison de leur potentiel de gonflement et de leur épaisseur. Si le matériau de remplissage dans le joint est stable et que l'ouverture du joint est réduite, l'ampleur du débordement sera principalement influencée par l'orientation.

Persson et al., rapportent une expérience menée par Seinov et Chevkin au cours de laquelle ils ont simulé des joints et rempli des fissures en utilisant trois plaques de verre (6 x 30 x 30 mm) séparées par des matériaux de différentes largeurs et impédances acoustiques, comme de l'air, de l'eau, du kaolin et du béton (Fig. I.10). [48], [59]

Les résultats ont montré qu'un milieu avec des fissures ouvertes permet une amélioration de la fragmentation lorsque la quantité d'explosif est augmentée. Dans le cas de fissures remplies de kaolin, l'énergie était absorbée, limitant ainsi l'amélioration de la fragmentation, même lorsque la charge spécifique augmentait. Lorsque l'impédance acoustique entre les plaques était augmentée à l'aide d'un mélange de ciment, une fragmentation accrue était

obtenue. L'utilisation d'eau dans les fissures, au lieu d'air, entraînait également une légère amélioration de la fragmentation.

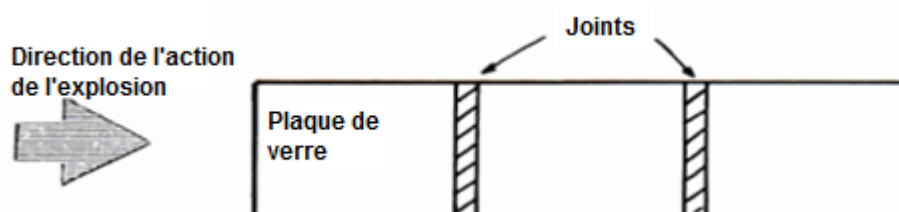


Fig. I.10. Expériences sur modèles de plaques de verre réalisées par Seinov et Chevkin [59].

La qualité de la masse rocheuse peut être évaluée à l'aide de l'indice RQD, qui est défini comme le rapport entre la longueur des carottes supérieures à 100 mm et la longueur totale de la carotte, multiplié par 100. Singh et Xavier ont rapporté qu'il est difficile de contrôler les dommages causés par les explosions dans des roches dont la valeur RQD est inférieure à 70%. Pour des valeurs de RQD inférieures à 50 %, il est recommandé d'utiliser un espacement rapproché, et une charge légère afin d'obtenir des résultats acceptables. [54]

I.3.6 État des joints

L'état des joints influe également de manière significative sur le profil final de l'excavation. Il a été constaté que l'augmentation de la rugosité des joints contribue à améliorer la stabilité des murs périphériques. Cette tendance s'observe également dans le cas des joints discontinus. [57]

I.4 Conclusion

Les coûts des opérations en aval peuvent être considérablement réduits en optimisant les paramètres de conception du dynamitage afin de garantir une fragmentation ciblée. Ces paramètres sont spécifiques à l'équipement utilisé et varient en fonction des catégories de mines. Un abattage efficace peut être obtenu en analysant la relation entre les paramètres de conception du tir et la fragmentation. Il est crucial d'établir un lien entre les résultats de la fragmentation de la roche et leur impact sur les opérations en aval.

Bien qu'il soit reconnu que la fragmentation influence de manière critique les opérations de chargement, il existe peu de données quantitatives disponibles pour élaborer des stratégies de tir rationnelles. Les discontinuités rocheuses, ayant une influence majeure sur les dommages causés par les explosions, doivent impérativement être prises en compte lors de la conception des tirs.

Les dommages induits par les explosions sur une masse rocheuse sont influencés par la qualité de celle-ci ainsi que par l'énergie explosive transmise. De plus, la qualité de la masse rocheuse est également affectée par la nature du remplissage des joints. En cas de remplissage faible des joints, le potentiel de gonflement et l'épaisseur du matériau diminuent la qualité de la masse rocheuse, augmentant ainsi les risques de dommages importants.

Chapitre II : Aperçu sur la méthode et le modèle utilisés

II.1 Introduction

L'amélioration de la qualité de la fragmentation lors de l'abattage à l'explosif revêt une importance particulière, notamment en raison de son impact sur le pourcentage des fragments obtenus. Développer un modèle fiable permettant de prédire la taille des fragments demeure un défi majeur, auquel de nombreuses études ont tenté de répondre. En effet, plusieurs travaux de recherche se sont penchés sur la prédiction de la taille moyenne des fragments issus du tir, avec des approches diverses et complémentaires. [60], [61]

L'équation classique de Kuznetsov joue un rôle fondamental, puisqu'elle établit une relation entre la taille moyenne des roches abattues, les caractéristiques de la roche et la consommation spécifique d'explosif. Toutefois, cette équation ne prend pas en compte certains aspects essentiels, notamment la distribution granulométrique des fragments et leur indice d'uniformité. [61]

Les modèles empiriques de fragmentation basés sur l'application de la fonction de distribution cumulative de Rosin-Rammler ont été largement utilisés dans l'abattage [62]. Langefors a développé sa méthode après de nombreuses observations sur le terrain, et celle-ci est largement adoptée dans les exploitations minières. Toutefois, pour actualiser cette approche, il est essentiel de prendre en compte l'effet des différents paramètres influençant la fragmentation. [63]

II.2 La méthode de Langefors

Depuis le début des années 1950, diverses formules et méthodes ont été développées pour le calcul des paramètres géométriques d'un plan de tir, tels que la charge, l'espacement et le sous-forage. Ces approches prennent en compte plusieurs facteurs, parmi lesquels le diamètre du trou, les caractéristiques des explosifs, la résistance à la compression de la roche, et bien d'autres. Dans le cas des tirs de petit diamètre, la méthode suédoise développée par Langefors constitue une référence incontournable. [64], [65]

La méthode de Langefors est une approche semi-empirique qui repose sur l'ensemble de la technique d'abattage. Elle ne se limite pas aux caractéristiques des explosifs utilisés, mais prend également en compte plusieurs paramètres géométriques de tir, tels que le diamètre de foration, le rapport de maille et la charge de colonne.

Son principal avantage réside dans sa capacité à intégrer un grand nombre de facteurs sans nécessiter des moyens de calculs puissants, contrairement à certains logiciels qui s'appuient sur des routines mathématiques complexes, comme le calcul par éléments finis ou les méthodes itératives [66]. Le principe fondamental retenu par Langefors repose sur le fait que l'efficacité de la charge linéaire diminue à mesure que l'explosif s'éloigne du pied du tir. Ainsi, l'énergie totale générée par l'explosion est principalement utilisée pour libérer le fond du trou. Lorsque ce pied est fortement obstrué par le tas de roches, la quantité d'énergie dirigée vers son dégagement augmente de manière significative. La problématique centrale consiste donc à déterminer la largeur de banquette optimale permettant un dégagement

efficace du pied et de la colonne. De ce fait, les dimensions géométriques réelles du tir au niveau du pied jouent un rôle crucial dans la qualité du résultat obtenu.

Les chercheurs suédois Langefors et Kihlström, ont développé une règle empirique permettant de calculer la banquette maximale admissible [63]. Cette règle prend en compte plusieurs paramètres essentiels, notamment ceux liés au massif rocheux, tels que la résistance de la roche, ainsi que des facteurs relatifs à la maille souhaitée, tels que l'espacement sur banquette, le diamètre de foration et l'inclinaison. Le type d'explosifs employés constitue également un élément déterminant dans cette approche, [67]

II.2.1 Paramètres du plan de tir

Le plan de tir se définit comme l'ensemble des opérations de forage de trous verticaux ou inclinés, disposés en une ou plusieurs rangées à partir d'une surface libre. Ces trous sont ensuite tirés successivement, créant une seconde surface libre et optimisant ainsi le processus de fragmentation. Les paramètres de conception du plan de tir sont illustrés dans la Fig. II.1.

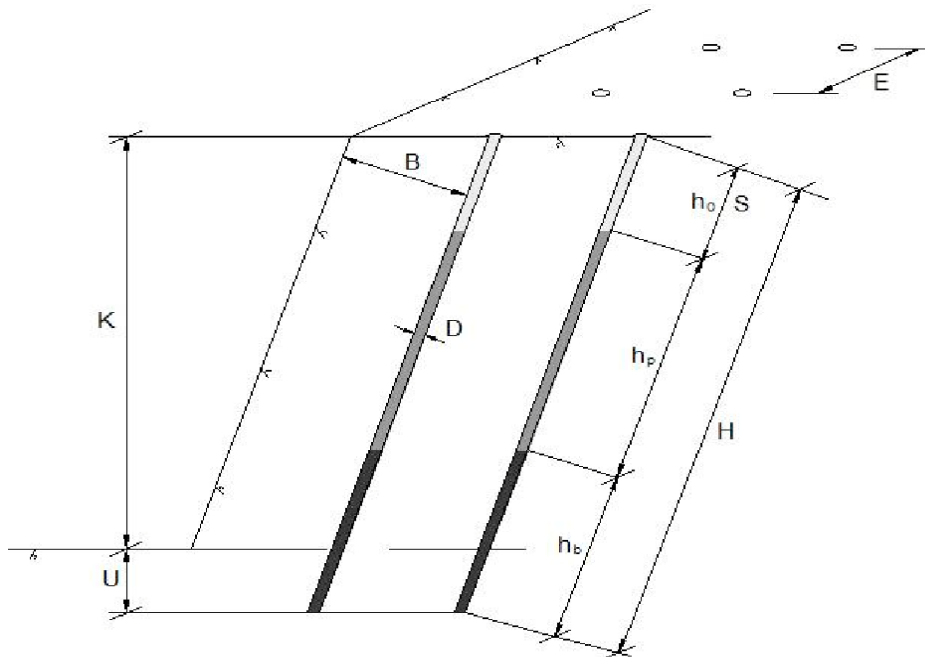


Fig. II.1. Paramètres pris en compte dans les opérations d'abattage à l'explosif. [63]

Ou:

- D : est le diamètre du trou de mine (m)
- K : la hauteur du gradin (m)
- B : la banquette (m)
- E : l'espacement du trou de mine (m)
- U : le sous-forage du trou de mine (m)
- S : (h_o) la longueur de bourrage (m)
- H : la longueur du trou de mine (m)
- h_p : la longueur de la charge de colonne (m)

h_b : la longueur de la charge de fond (m)

D'autres paramètres pris en compte dans les calculs des paramètres du plan de tir sont :

l_p : la concentration de la charge de la colonne (kg/m)

l_b : la concentration de la charge de fond (kg/m)

Q_p : le poids de la charge de la colonne (kg)

Q_b : le poids de la charge de fond (kg)

Q_e : est le poids total de l'explosif utilisé dans un trou (kg)

q : le facteur de poudre ou la charge spécifique (kg d'explosifs/m³ de roche)

g : le forage spécifique (mètres forés/m³ de roche)

Le schéma du trou de mine, le retard et la séquence d'initiation constituent des paramètres essentiels dans les opérations d'abattage, influençant directement l'efficacité et la qualité de la fragmentation.

La méthode de Langefors permet de déterminer la valeur théorique de la banquette (B_{th}) à partir de cinq paramètres fondamentaux et d'une constante, offrant ainsi un cadre méthodologique fiable pour l'optimisation des tirs en milieu minier.

$$B_{th} = 1.08 \times \sqrt{\frac{S \times L_f}{C \times R \times E / B}}, m \quad (1)$$

Selon Langefors [63], l'un des paramètres fondamentaux de la formule mentionnée ci-dessus est la résistance pondérale (S), également appelée coefficient énergétique. Ce coefficient représente l'énergie ou la concentration de la charge du fond.

Lorsque les explosifs utilisés dans ces deux charges sont différents, il est nécessaire de calculer une moyenne équilibrée du coefficient (S), en tenant compte de leur répartition respective afin d'assurer une répartition énergétique optimale. La charge linéaire (L_f) correspond à la quantité d'explosif par mètre linéaire de trou.

Pour les explosifs livrés en vrac, cette quantité est calculée en multipliant le volume d'un mètre de trou par la masse volumique (ρ) du produit.

Pour les produits livrés en cartouches, on détermine le nombre de cartouches ou la fraction de cartouche occupant un mètre de longueur de trou. On applique ensuite un coefficient de tassement (Kt), qui varie selon la nature de l'explosif, avant de multiplier le résultat par le poids unitaire des cartouches.

Le coefficient de tassement (Kt) à appliquer dépend du type d'explosif utilisé :

- De 1,06 à 1,08 pour les explosifs à faible consistance (gel, émulsion) ;
- De 1,04 à 1,06 pour les explosifs à consistance moyenne (dynamite) ;

- Et de 1,02 à 1,04 pour les explosifs à consistance dure (poudres explosives ou nitrées).

Comme pour le coefficient énergétique (S), l'utilisation d'explosifs de différentes natures dans la charge de fond nécessite une pondération de la charge linéaire afin d'obtenir une charge linéaire moyenne (Lf), garantissant une répartition homogène de l'énergie.

$$\text{Charge linéaire moyenne} = (Lf_{\text{cartouche}} \times 0,6) + (Lf_{\text{vrac}} \times 0,7) / 1,3; \text{ kg/m}$$

II.2.1.1 Coefficient d'inclinaison (C)

Lors du processus de tir, l'onde de choc de compression engendre une traction sur la surface libre, provoquant une fracturation secondaire qui joue un rôle clé dans la fragmentation des roches. L'efficacité de ce phénomène est directement proportionnelle à la taille de la surface libre et dépend de l'angle formé entre le front de taille et la verticale. [63]

Lorsque $\alpha = 0^\circ$, le coefficient d'inclinaison est $C = 1$. Pour des angles compris entre 10° et 30° , les valeurs de (C) sont les suivantes :

$$\alpha = 10^\circ \rightarrow C = 0,95$$

$$\alpha = 20^\circ \rightarrow C = 0,90$$

$$\alpha = 30^\circ \rightarrow C = 0,85$$

Pour les valeurs intermédiaires, une interpolation linéaire est appliquée afin d'obtenir une estimation précise de C, (Pour $\alpha = 12^\circ$, $C = 0,94$).

II.2.1.2 Résistance à la traction (R)

La résistance à la traction tient compte de la résistance au cisaillement de la roche. Dans le cas d'un terrain homogène, le coefficient de résistance à la traction est défini comme suit :

- 0,35 pour les roches élastiques ;
- 0,40 pour les roches de dureté moyenne ;
- 0,45 pour les roches plastiques.

Cette valeur est ajustée en fonction du degré de fracturation de la roche, afin de refléter au mieux les conditions réelles du massif [63].

II.2.2 État de fracturation

Dans le cas d'une roche de dureté moyenne ($R = 0,4$), l'état de fracturation joue un rôle déterminant dans la valeur du coefficient (R).

Si la fracturation est très faible, le massif rocheux est physiquement homogène et le coefficient (R) se rapproche de 0,35.

À l'inverse, si le massif est fortement fracturé, la désorganisation des structures internes entraîne une augmentation de (R), qui tend alors vers 0,45. [63]

II.2.3 Le rapport de rigidité (E/B)

Le rapport entre l'espacement des trous (E) et la banquette (B) joue un rôle clé dans la granulométrie des produits obtenus après abattage :

Pour la production de granulats, il est recommandé de respecter un rapport compris entre $1 < E/B < 1,3$; mais pour la fabrication d'embrochements, la granulométrie optimale se situe entre $0,8 < E/B < 1$.

Un rapport de rigidité trop faible entraîne une fragmentation moyenne des roches, tandis qu'un rapport trop élevé peut compromettre la qualité de la découpe du front de taille, affectant ainsi l'efficacité du processus d'abattage. [63]

II.2.4 La constante de Langefors

Après de nombreux essais de validation de la formule théorique, Langefors a établi un coefficient empirique égal à 1,08.

La valeur de la banquette obtenue par cette méthode reste théorique et doit être ajustée en fonction de plusieurs paramètres dépendant des conditions d'exploitation. Parmi ces éléments, on prend en compte :

- Les caractéristiques du massif rocheux (homogénéité, fracturation, résistance) ;
- La nature des explosifs utilisés et leur efficacité énergétique ;
- Les dimensions et la géométrie du plan de tir (inclinaison des trous, espacement, charge linéaire) ;
- Les contraintes opérationnelles et environnementales (conditions minières spécifiques, stabilité des terrains).

II.2.5 Les défauts d'implantation

Les défauts d'implantation sont des valeurs fixes indépendantes de la hauteur du gradin.

- **Erreurs de positionnement de l'engin de forage** ; L'erreur due à l'attaque du trou varie entre 0,5 et 1 fois le diamètre du trépan. Elle dépend du mode de localisation et de la nature du terrain au point d'attaque.

- **Écarts de forage** ; Les écarts de forage sont influencés par le type de forage utilisé (fond de trou ou hors trou) et par les discontinuités du massif rocheux. L'erreur est généralement de $0,5 \% \times$ hauteur du gradin.

Les erreurs moyennes générées par le réglage de l'angle ou de l'inclinaison du forage sont proportionnelles à la profondeur du forage. Dans ce cas, l'erreur est multipliée par la hauteur du gradin, et l'écartement réel (E) est défini par $E = 1,25 \times B_R$.

Il est admis que toutes les erreurs (ϵ) se cumulent de manière défavorable, sans possibilité de compensation. Par conséquent, la valeur de la banquette corrigée (B_R) est donnée par :

$$B_R = B_{th} - \sum \epsilon.$$

II.3 Modèle Kuz-Ram

Le modèle Kuz-Ram est couramment utilisé pour prédire la taille des fragments après un tir d'abattage. Cunningham a apporté des modifications au modèle empirique initialement proposé par Kuznetsov, afin d'affiner la prédiction de la taille moyenne des fragments d'un tas de déblais. [68], [63]

Cette amélioration repose sur l'intégration de la fonction de distribution de taille développée par Rosin et Rammler, qui permet de mieux représenter la répartition granulométrique des fragments obtenus après l'explosion.

L'équation de Kuznetsov permet d'estimer la taille moyenne des fragments après un tir d'abattage. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$X_{50} = A \left(\frac{V}{Q_e} \right)^{0,8} Q_e^{1/6} \quad (2)$$

Où :

X_{50} : La taille moyenne des fragments, cm

A : Le facteur de résistance de la roche, 7 pour les roches moyennes, 10 pour les roches dures et fortement fissurées et 13 pour les roches dures et faiblement fissurées Gheibie. [69]

V : Le volume de roche tirée par trou de mine, m^3

Q_e : La charge explosive par trou, kg.

Cunningham a indiqué que la valeur se situe entre 8 et 12, même dans le cas d'une masse rocheuse très faible. Cette variation influe directement sur la prédiction de la taille moyenne des fragments après un tir. [68]

Si Q représente le poids d'explosif utilisé par trou de mine et que sa résistance pondérale relative à l'ANFO est S_{ANFO} , alors une correction de Q en fonction de cette valeur est nécessaire afin d'affiner les calculs et optimiser la prédiction de la fragmentation.

Alors: $Q_e = Q \left(\frac{S_{ANFO}}{115} \right)$. Le rapport V/Q est également l'inverse de la consommation spécifique q en kg/m^3 , $\left(\frac{V}{Q} = \frac{1}{q} \right)$. Par conséquent, l'équation (2) peut s'écrire comme suit :

$$X_{50} = A q^{-0,8} Q^{1/6} (115/S_{ANFO})^{0,633} \quad (3)$$

II. 3.1 Analyse de la distribution de la taille des fragments

L'évaluation de la distribution granulométrique des fragments constitue une étape essentielle du processus de fragmentation de la roche par explosif. L'équation de Kuznetsov ne prend pas en compte la répartition granulométrique ni l'indice d'uniformité des fragments,

ce qui limite son efficacité lorsqu'on travaille uniquement avec la taille moyenne de fragmentation.

Pour pallier cette limitation, il a été démontré que la fonction de distribution de Rosin-Rammler permet d'obtenir une description plus précise des fragments d'un tas de déblais. [68]

$$P_x = 1 - e^{-(X/X_c)^n} = 1 - e^{-\ln(2)(X/X_{50})^n} = 1 - e^{-0,693(X/X_{50})^n} \quad (4)$$

Ici,

P_x : La proportion de matériau traverse le tamis

X : L'ouverture du tamis, cm

X_c : La taille caractéristique en cm pour 63,2 % de passant

n : l'indice d'uniformité.

En utilisant X et P_x , nous trouvons :

$$X_c = \frac{X}{\sqrt[n]{-\ln(1-P_x)}} \quad (5)$$

Étant donné que la formule de Kuznetsov donne la taille de fragment de X_{50} pour laquelle 50% du matériau passerait, en remplaçant les valeurs de $X = X_{50}$ et $P_x = 0,5$ dans (5), on obtient :

$$X_c = X_{50} / \sqrt[n]{0,693} \quad (6)$$

L'exposant n dans l'équation de Rosin-Rammler est essentiel pour caractériser l'uniformité de la distribution granulométrique des fragments après un dynamitage ou un processus de concassage. Cunningham a proposé une approche pour estimer cet exposant à partir de paramètres empiriques liés aux propriétés de la roche et aux conditions de fragmentation.

Un point de l'équation de Rosin et Rammler est la taille de fragment que 50 % de la roche laisserait passer et est donné par l'équation de Kuznetsov. La distribution de la taille des fragments et leur indice d'uniformité étaient nécessaires pour définir l'exposant n dans l'équation de Rosin et Rammler. Cunningham a développé l'équation suivante pour prédire n [68] :

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{\varphi_n}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B}\right) \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{L_e}{K}\right) \quad (7)$$

Où:

B : La banquette, m

S : L'espacement, m

φ_n : Le trou de tir, mm

W : L'écart type de la précision de forage, m

L_e : La longueur totale de la charge, m

K : La hauteur du gradin, m.

Gustafsson a suggéré un trou de forage de 3 cm/m comme nombre acceptable pour le forage défectueux ou l'écart du trou de forage [70]. Cunningham a également présenté que la précision de forage est maintenue constante à 0,45 m d'écart type de la précision de forage W au fond du trou pour une hauteur de gradin de 12 m [68]. Considérant le sous-forage U avec la hauteur du gradin, à peu près la même valeur pour W a été proposée à la fois par Gustafsson et Cunningham.

La fragmentation des roches par explosif dépend de nombreux paramètres qui vont bien au-delà du facteur de résistance de la roche A . Étant donné que la masse rocheuse est un matériau discontinu et hétérogène, ses propriétés physiques et mécaniques influencent directement la propagation des ondes de choc et la formation des fragments après le dynamitage.

Parmi les paramètres clés qui affectent la fragmentation, on peut citer :

- La structure de la roche : Présence de fractures, de fissures naturelles ou de variations lithologiques.
- La teneur en eau : Une roche saturée peut absorber une partie de l'énergie de l'explosion, modifiant ainsi la distribution des fragments.
- La densité et la porosité : Influencent la vitesse de propagation des ondes et le comportement de la roche sous contrainte dynamique.
- Le schéma de forage et de chargement : La disposition des trous de forage et le type d'explosif utilisé jouent un rôle majeur dans l'efficacité du processus de fragmentation.

Lily a décrit comment les paramètres de la masse rocheuse qui affectent de manière significative le tir sont évalués et comment cette évaluation est combinée pour calculer l'indice de tirabilité (BI) [71]. L'indice de tirabilité (BI) est un concept fondamental pour évaluer l'efficacité d'un tir en fonction des caractéristiques géologiques du massif rocheux. En combinant plusieurs paramètres, il permet d'obtenir une estimation quantitative de la réponse de la roche à l'explosif. Voici les cinq paramètres principaux :

- Description de la masse rocheuse (RMD): Qualifie l'état du massif rocheux, incluant la cohésion, la résistance et la présence de discontinuités.
- Espacement des plans de joint (JPS): Distance moyenne entre les fractures ou les joints dans la roche, influençant la propagation de l'onde de choc.
- Orientation des plans de joint (JPO): La direction et l'inclinaison des joints par rapport au schéma de tir, ce qui détermine la facilité de fragmentation.

- Influence de la gravité spécifique (SGI): La densité de la roche, qui impacte l'énergie nécessaire à sa fragmentation.
- Dureté Mohs (HF): Une mesure de la résistance de la roche à la pénétration, influençant directement l'efficacité de l'explosif.

Ces paramètres sont intégrés dans une équation empirique qui permet de calculer le BI, une valeur qui aide à optimiser les opérations de dynamitage.

$$BI = 0,5(RMD + JPS + JPO + SGI + HF) \quad (8)$$

Cunningham a apporté une modification au modèle Kuz-Ram en ajustant la définition du facteur de résistance de la roche A afin de mieux refléter les variations des propriétés de la masse rocheuse [72]. Cette adaptation permet d'améliorer la précision des prédictions de fragmentation en tenant compte des caractéristiques spécifiques de différents types de roche.

Le modèle Kuz-Ram est largement utilisé pour estimer la taille des fragments après dynamitage et repose sur des relations empiriques combinant l'énergie de l'explosif, la masse rocheuse et les schémas de fragmentation. En redéfinissant A, l'objectif est d'affiner l'estimation de la distribution granulométrique et d'adapter le modèle à une gamme plus large de conditions géologiques.

$$A = 0.06 (RMD + JF + RDI + HF) \quad (9)$$

Cunningham a affiné l'indice d'uniformité dans le modèle Kuz-Ram modifié afin d'améliorer la précision de la distribution granulométrique des fragments après dynamitage. L'indice d'uniformité est essentiel pour quantifier la répartition des tailles de fragments et ajuster les prévisions en fonction des propriétés spécifiques de la masse rocheuse. [72]

Dans cette version améliorée, l'intégration de paramètres d'abattage à l'explosif vise à mieux refléter les conditions de terrain et optimiser les résultats de fragmentation. Ce modèle modifié est particulièrement utile dans l'industrie minière et pour les opérations de terrassement, où une bonne compréhension des facteurs de fragmentation permet de maximiser l'efficacité des explosifs tout en contrôlant la granulométrie obtenue.

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{\varphi_h}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B}\right)^{0,5} \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{L_e}{K}\right) \quad (10)$$

L'ajout de deux explosifs différents dans un trou de mine, une charge d'amorçage et une charge principale, modifie la dynamique du processus de fragmentation. La charge d'amorçage joue un rôle crucial en initiant la réaction et en favorisant une mise à feu uniforme de la charge principale, ce qui peut influencer la pression générée et donc la taille des fragments obtenus.

Dans ce contexte, l'équation (7) est ajustée pour tenir compte de cette interaction entre les explosifs. Cette modification permet une meilleure estimation de la fragmentation, car elle intègre la synergie entre la charge d'amorçage et la charge principale pour affiner la prédiction des tailles de fragments.

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{\varphi_h}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B}\right)^{0,5} \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{L_e}{K}\right) \left(0,1 + \frac{|BCL-CCL|}{L_e}\right)^{0,1} \quad (11)$$

Où:

BCL: La longueur de la charge d'amorçage, m

CCL: La longueur de la charge principale, m.

L'indice d'uniformité est un paramètre clé dans la caractérisation de la distribution des fragments après un dynamitage. Selon Cunningham, il varie généralement entre (0,6 et 2,2), avec des interprétations spécifiques [68]:

La valeur proche de 0,6 indique une fragmentation très irrégulière, où l'on observe à la fois des particules fines (poussière) et de gros blocs rocheux. Cela peut être le résultat d'un dynamitage inefficace ou d'une hétérogénéité marquée dans la masse rocheuse.

La valeur proche de 2,2 reflète une fragmentation plus uniforme, avec des fragments de taille similaire et proches de la moyenne. Ce type de distribution est souvent recherché pour faciliter le transport et la manipulation des déblais.

L'ajustement de cet indice dans les modèles de prévision de fragmentation permet aux ingénieurs de mieux optimiser les paramètres du tir et de choisir les bonnes conditions de chargement des explosifs.

L'ajustement du modèle Kuz-Ram par Gheibie apporte une modification qui permet d'affiner la prédiction de la fragmentation, notamment avec un motif décalé. En multipliant l'équation par 1,1, on ajuste l'estimation pour mieux refléter l'effet des interactions entre les trous de forage et les schémas de dynamitage. [69]

Le modèle modifié prend en compte des ajustements spécifiques pour X_{50} (la taille médiane des fragments) et (l'indice d'uniformité). Ces modifications permettent d'améliorer l'adéquation du modèle aux conditions réelles du terrain et d'obtenir une meilleure correspondance avec les résultats observés.

$$X_{50} = 0,073A'q^{-0,8}Q^{1/6} \left(\frac{115}{S_{ANFO}}\right)^{0,633} \quad (12)$$

$$n' = 1,88(A')^{-0,12} \quad (13)$$

$$A' = RMD + JF + RDI + HF \quad (14)$$

Cette différence de 22 % entre les estimations de X_{50} dans les modèles Kuz-Ram modifiés par Gheibie et Cunningham souligne l'impact des ajustements du facteur A et A' sur la prédiction de la fragmentation. [69], [72]

L'augmentation de X_{50} dans le modèle de Gheibie signifie que la taille médiane des fragments prévue est plus grande, ce qui peut être attribué à une définition plus permissive du facteur de résistance de la roche ou à une prise en compte différente des paramètres influençant la fragmentation. Ce type de variation est essentiel dans les analyses de dynamitage, car il influence directement l'efficacité de la fragmentation, les coûts de traitement et la sélection des explosifs.

Certaines relations entre n et la taille des fragments de la fonction de distribution cumulative de Rosin et Rammler ont également été données. Les relations entre n et deux tailles de fragments (X_{80} et X_{50} , X_{50} et X_{20}) sont calculées par la courbe de Rosin et Rammler en utilisant $X = X_{50}$, $P_x = 0,8$ et $P_x = 0,2$ dans l'équation (4) à partir des formules :

$$n = -0,842/(\ln X_{80} - \ln X_{50}); n = -1,133/(\ln X_{50} - \ln X_{20}) \quad [73], [74].$$

La relation entre n et les tailles de fragments X_{80} et X_{20} peut également être obtenue comme:

$$n = -1,1974/(\ln X_{80} - \ln X_{20}).$$

II.4 Conclusion

La théorie de Langefors et le modèle Kuznetsov-Rammler nous donne une distinction évidente. Bien que Langefors fournisse une approche satisfaisante pour analyser l'effet des paramètres clés sur la fragmentation, sa limitation principale réside dans le fait qu'elle se base uniquement sur la résistance à l'arrachement, un paramètre souvent difficile à déterminer précisément en amont. De plus, elle ne permet pas une quantification détaillée de la qualité de la fragmentation.

En revanche, le modèle Kuznetsov-Rammler apporte une perspective plus complète en intégrant des variables spécifiques au massif rocheux, ce qui permet d'obtenir une étude quantitative plus fiable et adaptable aux conditions réelles du terrain. Cela est particulièrement utile dans les environnements hétérogènes, où la conception d'un plan de tir optimal reste un défi majeur.

Chapitre III : Etudes géologiques et minières de la carrière d'Héliopolis Guelma

III.1 Introduction

L'importance de cette recherche qui est consacrée à résoudre le problème de la qualité de la fragmentation nécessite d'abord d'identifier le site minier spécifié de ce travail, c'est pourquoi ce chapitre donne une brève étude géologique, topographique et technologique de la carrière de calcaire d'Héliopolis.

III.2 Description du site

A environ 5 km de cette wilaya, au nord, sur la route nationale Annaba Guelma (RN 21) se trouve la Daïra d'Héliopolis qui compte un certain nombre de carrières dont la carrière UCPM (Unité de construction et de production de matériaux). D'un point de vue stratégique et géologique, ce massif est situé au Douar Bouzitoune avec une superficie de 30 H, il est également limité par Hammam Ouled Ali au Nord, ville de Guelma au Sud, Héliopolis à l'Est et la commune d'El Fdjouj à l'Ouest (Fig. III.1). [75]

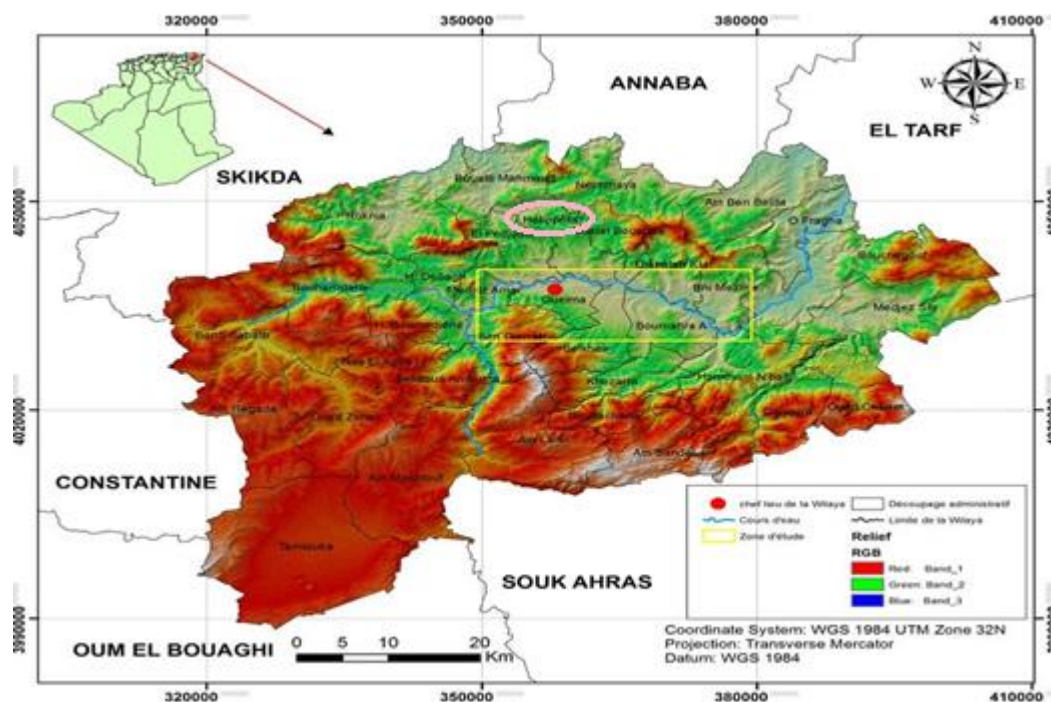


Fig. III.1. Localisation géographique de la zone d'étude. [75]

III.3 Cadre géologique

Les formations néritiques sont longues de 160 km Est-Ouest et 80 km Nord-Sud, cette zone aurait émergé à la fin du Crétacé et aurait subi par la suite un léger déplacement vers le Sud. La série la plus complète est représentée par l'extrémité Est du Djebel Debbagh qui passe sous la nappe phréatique pour réapparaître en fenêtre au niveau de la piscine romaine d'Héliopolis et dans l'angle Sud de la station de Nador. Cette série comprend :

Des calcaires compacts avec intercalation de marnes épaisses de 150 m d'âge Sénonien, des calcaires massifs de l'Albien et du Cénomaniens inférieur, des calcaires compacts de l'Aptien et

des calcaires récifaux du Cénomanién supérieur [76], [77]. La masse rocheuse de la carrière d'Héliopolis fait partie des massifs nord-est de la série néritique constantinoise. Ce complexe se subdivise en deux parties partiellement superposées, la première séquence néritique comprenant une série de formations condensées à dominante carbonatée et siliceuse du Jurassique et du Trias, et la seconde est constituée des formations allochtones à dominante argilo-marneuse et quartzique [77]. Le terrain d'Héliopolis est un plateau constitué de roches meubles (sables, argiles et éboulis) d'âge quaternaire, où le sous-sol est constitué de formations récentes d'âge miopliocène (grès, argiles). Plus particulièrement la zone où se situe le gisement étant donné la compacité de la roche calcaire grise à beige qui ne permet pas l'infiltration des eaux de pluie en profondeur, d'où l'inexistence de sources d'exutoires sur les flancs et au pied du gisement. Le massif rocheux de la carrière de bouzitoune, fait partie des massifs nord-est de la série néritique constantinoise [77], [78]. (Fig. III.2)

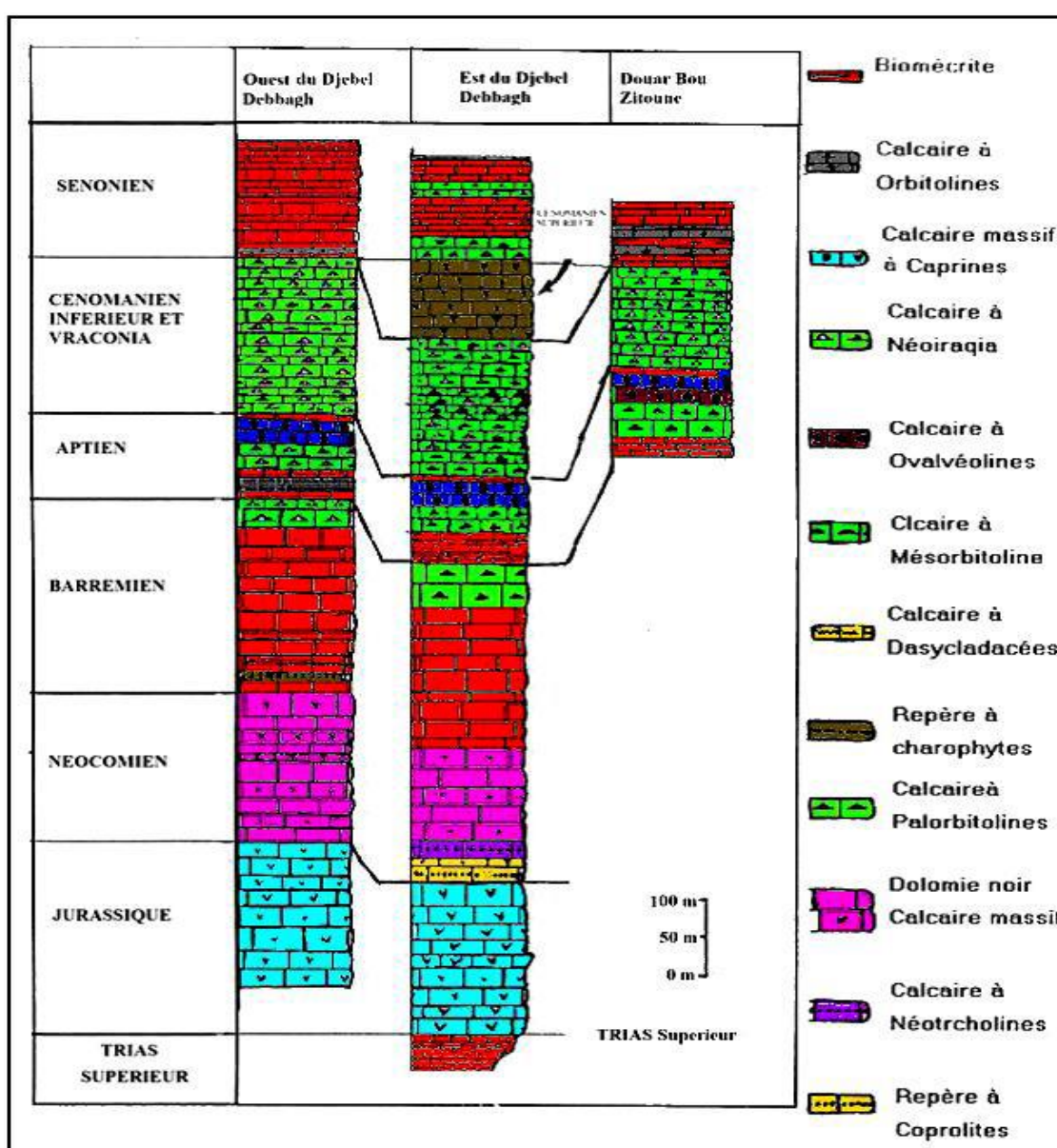


Fig. III.2. Les formations autochtones des séries néritiques constantinoises de la région de Guelma. [77]

III.4 Tectonique de la région d'étude

La région correspondant à la chaîne de l'Atlas tellien et du Tell, dont fait partie la chaîne numide, est extrêmement tortueuse et on y trouve des exemples d'accidents tectoniques de toutes sortes représentés. Les effets tectoniques dans la région de Guelma se manifestent principalement par des phénomènes de compression et de refoulement intense des plis qui se déversent généralement vers le Sud et le Sud-Est. Ces plis, souvent superposés les uns sur les autres, se superposent comme des écailles imbriquées. Dans la région de Guelma, les plis d'orientation Est-Ouest sont représentés au niveau de la chaîne de Taya-Debagh et qui se prolongent vers l'Est par le massif de Bouzitoune et Djbel Houara. [79]

La zone de Guelma c'est le domaine néritique de Djebel Debagh, Héliopolis et le sud de Guelma. Cette unité à faciès carbonaté Jurassique-Crétacé, karstifiée est surmontée par plusieurs nappes de charriages et soumise à de grands accidents tectoniques. La vallée de Guelma est un ancien bassin d'effondrement longtemps fermé où s'est entassé un ensemble varié de sédiments allant du Miocène au Plio-Quaternaire. Les mouvements tectoniques du Plio-quaternaire ont une grande attribution dans la morphogenèse de la région. [80]

La région de Guelma, située entre le littoral et les abords des Hauts plateaux, se caractérise par un dispositif structural assez complexe. C'est précisément dans cette zone que se sont manifestés successivement, à toutes les époques avec le plus d'intensité, les mouvements orogéniques qui ont affecté cette partie de l'Algérie. La région qui correspond à la chaîne de l'Atlas tellien et au Tell dont fait partie la chaîne numidique, se trouve extrêmement tourmentée et on y trouve représentés des exemples d'accidents tectoniques de tous genres. Les effets tectoniques dans la région de Guelma se sont manifestés surtout par des phénomènes de compression et de refoulement intense des plis qui sont en général déversés vers le Sud et le Sud-Est. Ces plis, souvent empilés les uns sur les autres, se chevauchent et se recouvrent à la façon d'écailles imbriquées. Ce phénomène de structure écaillée est fréquent dans la chaîne atlasique. Dans ces plis déversés, les flancs inverses sont le plus souvent supprimés par compression et/ou par étirement.

Les formes synclinales s'observent par endroit, dans les zones plus ou moins épargnées par les effets tectoniques. Quant aux voûtes anticlinales, elles sont assez rares et quand elles existent, elles se trouvent plutôt à l'état de brachy-anticlinaux ou de dômes, structurés en horst et graben. [79]

III.5 Calcaires et travertins

Ce faciès épais de quelques mètres, s'étend sur une grande surface de la région, il est le résultat d'un dépôt d'eau à petite cascade ; soit aux émergences de certaines sources. C'est une roche sédimentaire à aspect concrétionné. Son aspect caverneux est dû probablement en partie à la disparition par fermentation de débris végétaux encrustés de carbonates d'origine biochimique. Les travertins de Guelma et d'Héliopolis sont grossièrement lités de couleur jaunâtre à grisâtre. [80], [81]

III.6 Carte topographique de la carrière

La carrière UCPM (Unité de Production de Matériaux de Construction) est située à Mechta, Bouzitoune (altitude 362 m), le gisement de la carrière Héliopolis est un gisement à

flanc de coteau dont la pente varie de 25 à 30°. L'ouverture de cette carrière consiste à réaliser une demi-tranchée partant de la base de la dépression jusqu'à son sommet qui doit être commun à tous les niveaux de la carrière. Les travaux d'exploitation partent du haut vers le bas de l'anticlinal avec un seul bord, l'exploitation est réalisée selon sept gradins, qui ont des hauteurs de 13 à 15 m (Fig. III.3).



Fig. III.3. Carte topographique de la carrière de calcaire – Héliopolis
(Google Earth)

Le massif rocheux à décomposer est un calcaire avec intercalation de dolomies. Le caractère le plus évident d'observation du massif rocheux est la présence des surfaces des discontinuités. [82]

Au niveau de la carrière de calcaire d'Héliopolis (Guelma, Algérie) plusieurs types de discontinuités ont été identifiés (Fig. III.4).

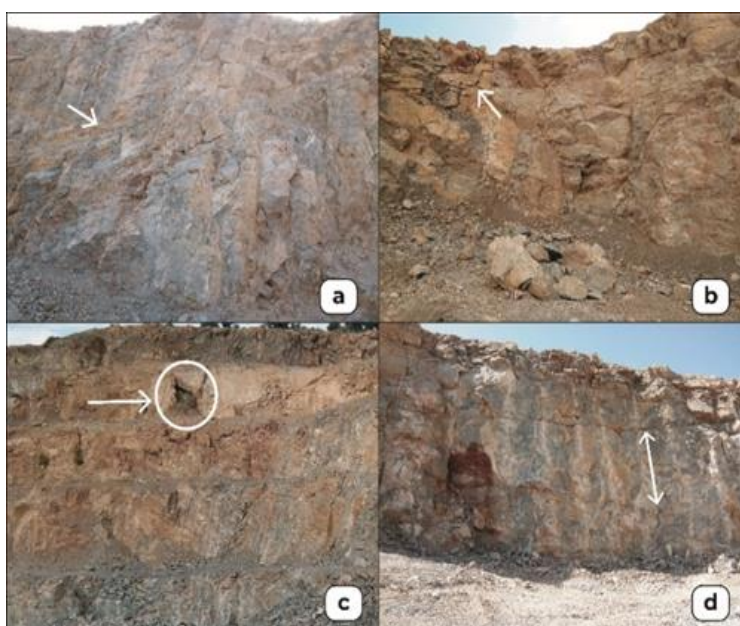


Fig. III.4. Différents types de discontinuités dans la masse rocheuse de la carrière d'Héliopolis, a – joints stratigraphiques, b – joints, c – karsts, d – failles (Photos personnelles)

III.7 Processus d'extraction du calcaire d'Héliopolis

Les travaux d'exploitation commencent à partir du sommet vers le bas de l'anticlinal avec un seul bord, l'exploitation est menée selon sept gradins, le premier est un gradin de découverte ce qui construit par des moyens mécaniques, il contient beaucoup de stérile (argile) $AL_2O_3H_2O$. Les gradins suivants ont des hauteurs de 13,5 à 15m. (Fig. III.5)



Fig. III.5. Vue ensemble de la carrière du calcaire d'Héliopolis (photos personnelle)

Les caractéristiques physico-mécaniques du calcaire de la carrière d'étude sont enregistrées dans le tableau suivant :

Tableau. III.1. Les caractéristiques du calcaire de la carrière d'Héliopolis.

Caractéristiques	Valeur	Unité
Densité	2.7	-
Dureté	7	-
Coefficient de foisonnement	1.5	-
Abrasivité	Générale abrasive	-
La fissuration	Moyenne	-
Masse volumique	2.7	kg/m ³
Coefficient de la résistance	0.65-1.1	-
Porosité superficielle (P)	0.6-4	%
Résistance à la compression (Rc)	40-60	MPa

Le tir dans la carrière du calcaire d'Héliopolis est assuré parfois par deux types d'explosifs (Anfomil et Marmanit) et d'autres cas par trois types d'explosifs (Anfomil, Marmanit et Timex) chargés dans un trou avec une structure continue et parfois discontinue, l'amorçage de la charge explosive se réalise par le cordeau détonant c'est-à-dire un amorçage latérale.

La Marmanit est un explosif pulvérulent de couleur grise, constituée de nitrate d'ammonium et d'un explosif brisant. Ce type d'explosif est caractérisé par une densité d'encartouchage moyenne. Elle est utilisée pour l'abattage des roches semi dures ; dans des terrains secs ou faiblement humides et elle est adaptée aux terrains de roches tendres et mi-dures.

La Marmanit est un explosif de sûreté, peu sensible aux actions mécaniques et se caractérise par une charge linéaire réduite qui favorise son utilisation pour les roches mi-dures. (Poids de 100kg, dimension : 30×135mm)

Le Timex fait partie des explosifs en émulsions. Ce type d'explosif fabriqué par l'ONEX offre par rapport aux explosifs classiques des avantages substantiels à savoir :

- Produit hydrofuge, utilisé pour l'exploitation minière à ciel ouvert et souterraine, même en milieu subaquatique.
- Produit plus sécurisant lors du transport du stockage et de leur utilisation.

En terme de performance, le Temex possède tous les avantages des explosifs classiques et constitue de ce fait un substitutif de choix.

En terme de compatibilité, le Temex peut être utilisé en association avec les autres explosifs classiques et en particulier l'ANFO pour l'optimisation du rendement du tir (effet de poussée supplémentaire surtout pour les grandes exploitations. (Poids de 250kg, dimension: 30×300mm), IL se caractérise par:

- Une consistance gélatineuse très résistante à l'eau.
- Explosif dense traduit par une vitesse de détonation élevée.
- Explosif de sûreté peu sensible aux actions mécaniques.

L'Anfomil est un explosif nitraté de couleur blanche-rose, d'aspect fluide contenant comme combustible du fuel oil domestique il est amorcé au moyen de cordons détonant ou un autre explosif brisant. Est utilisé pour l'exploitation minière à ciel ouvert ;

L'ANFO est livré en sac polyéthylène/polypropylène de 25kg. Avec les avantages suivants:

- Facile de transporter et de charger dans les trous de mine.
- Explosifs de sûreté peu sensible aux actions mécaniques.
- Un bon remplissage des trous de mines « espace granulaire ».

Les caractéristiques techniques de ces types d'explosif ont été enregistrées dans le tableau suivant.

Tableau. III.2. Caractéristiques techniques des explosifs utilisés dans la carrière du calcaire d'Héliopolis.

Type d'explosifs	Marmanit III	Temex I	Temex II	Anfomil
Nature	pulvérulent	gélatineux	gélatineux	/
Densité d'encartouchage (gr/cm ³)	1,00	≈ 1,22	≈ 1,22	0,85
résistance à l'eau	moyenne	très bonne	très bonne	faible
Vitesse de détonation (m/s)	4200	4500-5500	4000-5000	2600±10 0
Puissance RWS sur mortier balistique (%)	75	15-20	14-18	80±1
Essai au bloc de plomb (TRAUZEL) (cm ³ /10gr)	360	≥320	≥260	967

Après avoir effectué le tir une partie de roches abattues présente des blocs qui ne sont pas accessibles dans la trémie du concasseur, ces morceaux sont dits hors gabarit. Ces blocs nécessitent alors un débitage secondaire qui se réalise par des moyens mécanique (brise roche).

Au niveau de la carrière d'Héliopolis, les engins utilisés pour charger les roches abattues sont les chargeuses sur pneus. Concernant le transport de la masse rocheuse fragmentée dans la carrière d'Héliopolis est assuré par des camions. Qui ont été choisis en fonction de la productivité de la carrière, selon les caractéristiques des charges à transporter, du type des engins de chargement et de la distance de transport.

L'étape de traitement mécanique de roches fragmentées nécessite l'installation des concasseurs, qui sont indépendant l'un de l'autre, dans la carrière existe trois types de concasseurs essentiellement c'est la station dragon (concasseur primaire et secondaire), avec une ouverture de 1200mm. Le calcaire extrait de la carrière d'étude, une fois concassé et calibré, devient un granulats idéal pour les routes (couches de fondation et de base), le béton, les enrobés bitumineux et le ballast ferroviaire. Il constitue la structure même de nos infrastructures.

III.8 Conclusion

L'analyse des données de la région de Guelma en général, et de la carrière de granulats d'Héliopolis en particulier, pourrait quantifier les informations géologiques et affiner notre compréhension du gisement. L'étude de l'avancement des opérations d'extraction actuelles et l'analyse des résultats obtenus montrent que le dynamitage des roches est une opération technologique très importante. Malgré toutes les suggestions inhérentes à l'utilisation d'explosifs, la qualité de la fragmentation des roches dures reste un problème majeur pour les ingénieurs des mines.

Chapitre IV : Influence de la structure du massif rocheux et de la technique du tir sur les résultats de l'abattage cas de la carrière d'Héliopolis, Guelma

IV.1 Etude de l'influence de la maille de forage sur la qualité de la fragmentation

IV.1.1 Introduction

Le processus de fragmentation des roches dans l'exploitation minière mérite d'être réévalué afin d'améliorer la productivité des mines tout en minimisant les effets secondaires. En effet, une meilleure fragmentation peut engendrer des économies de coûts considérables. L'analyse de la granulométrie fournit ainsi un flux continu de données, permettant aux opérateurs de prendre des décisions éclairées basées sur des résultats de fragmentation quantifiables. Par conséquent, l'évaluation de la fragmentation lors du tir à l'explosif, ainsi que pendant les étapes subséquentes de chargement, de transport et de traitement mécanique, constitue un enjeu majeur pour le contrôle et l'optimisation des activités minières.

L'objectif principal de cette partie est d'étudier la distribution granulométrique des roches fragmentées obtenue après une explosion sur la base de la conception des paramètres géométriques d'un modèle de tir, essentiellement d'avoir l'influence de la maille de trous sur les résultats obtenus. Des méthodes directes et indirectes sont disponibles pour déterminer la qualité des résultats d'un tir à l'explosif, la méthode la plus précise est évidemment de tamiser l'ensemble du tas de roches abattues. Bien que cela soit possible pour de petites quantités de matériaux fragmentés, c'est pour ça cette recherche est basée sur l'application du modèle de prédiction de la fragmentation Kuz-Ram pour prédire les performances d'abattage.

En général, le rapport espacement/banquette varie entre 1 et 2, mais le rapport espacement/banquette optimal était de 1,15 pour une maille décalé et de 1,25 pour une maille rectangulaire [32].

IV.1.2 Maille carrée

Généralement, la maille est l'unité de surface de la banquette entre deux, trois ou quatre trous adjacents. Autrement dit, elle désigne la disposition des trous sur une ou plusieurs rangées ; dans ce cas, la maille carrée se caractérise par la même distance entre les trous que celle entre les rangées.

Les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux (voir annexe 5) et représentés sous forme de courbes ci-dessous.

Les courbes présentées ci-dessous (Fig. IV.1) illustrent la distribution granulométrique des roches fragmentées obtenues après le tir dans le cas de l'utilisation de la maille carrée.

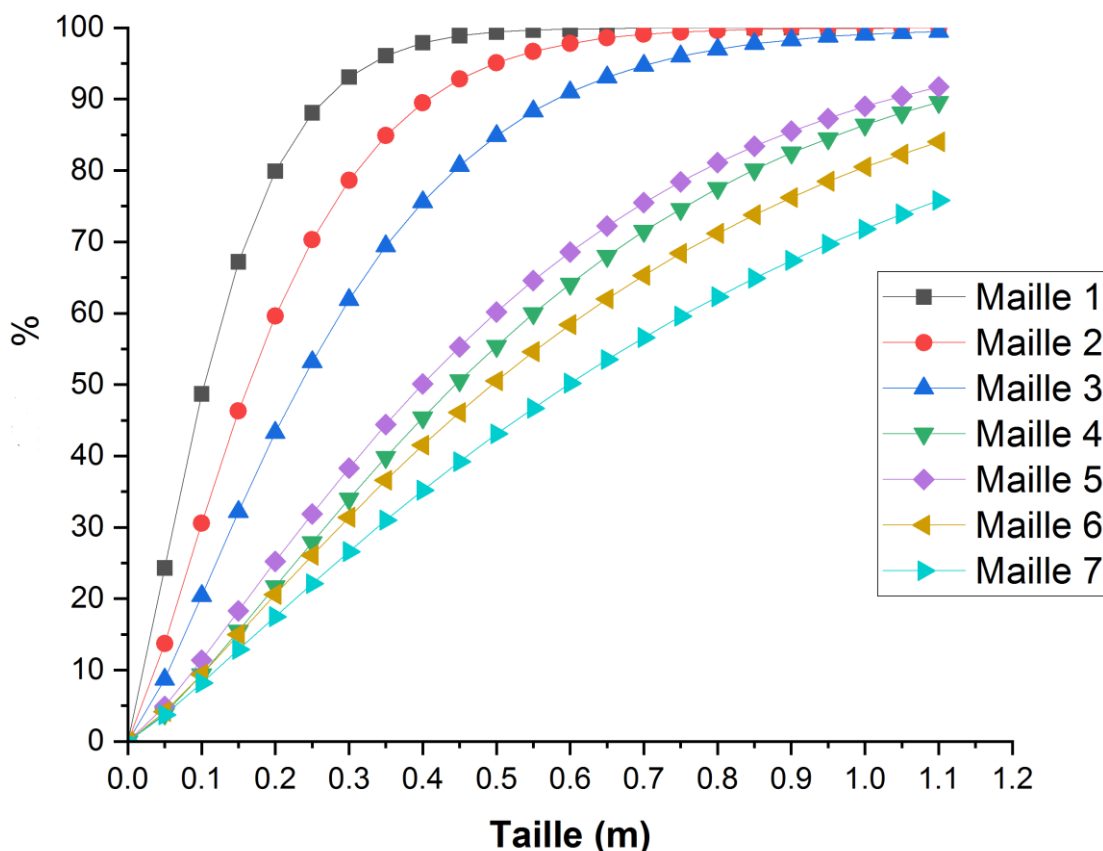


Fig. IV.1. Courbes obtenues de la distribution granulométrique dans le cas d'utilisation de la maille carrée.

Les courbes révèlent que la maille 3, avec une banquette de 2,5 m et un espacement de 2,5m, offre la meilleure distribution granulométrique.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs cibles et prévues du calcaire fragmenté par l'explosif, dans le cadre de l'application d'une maille carrée.

Tableau. IV.1. Valeurs cibles et prévues de fragmentation de la roche obtenues dans le cas d'utilisation de la maille carrée.

Taux de fragmentation, %	Dimensions de la maille carrée, m						
	1.5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Très grand (indésirable)	0	0,4	3	9,6	18,9	28,8	37,7
Optimal (ciblé)	75.7	86	88.3	84.1	76.1	67.1	58.6
Très petits (fines)	24.3	13.7	8.7	6.3	4.9	4.2	3.7

Les courbes ci-dessous (Fig. IV.2) illustrent les valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenues lors de l'utilisation de la maille carrée.

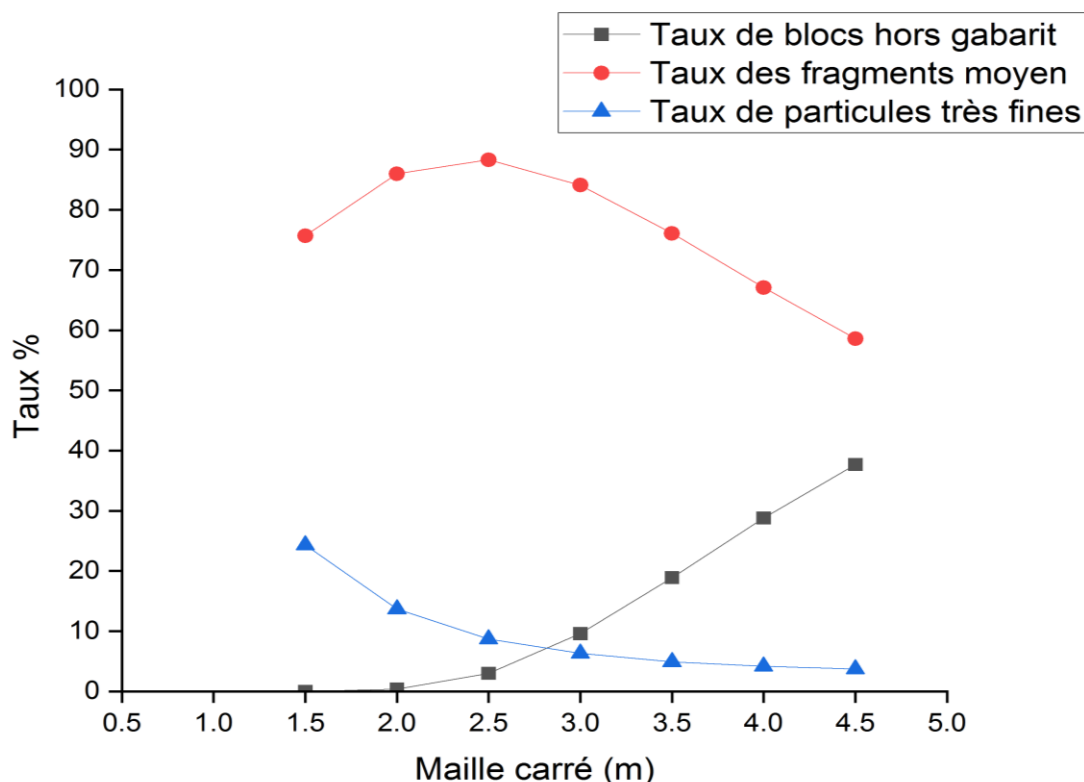


Fig. IV.2. Courbes représentant les valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenues lors de l'utilisation de la maille carrée.

D'après les courbes représentant les valeurs cibles et prévues des fragments obtenus dans le cas de l'utilisation d'une maille carrée, les principales observations suivantes peuvent être faites :

- Le meilleur taux de granulométrie moyenne des fragments est atteint avec une maille carrée de dimension 2,5 m.
- Le taux de blocs hors gabarit augmente proportionnellement à l'augmentation des dimensions de la maille.
- Le taux de particules fines diminue à mesure que les dimensions de la maille augmentent.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille carrée.

Tableau. IV.2. Valeurs de coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille carrée.

Dimensions de la maille carrée, m	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Coefficient d'uniformité	1.26	1.31	1.31	1.29	1.26	1.22	1.17

La courbe ci-dessous (Fig. IV.3) représente les valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille carrée.

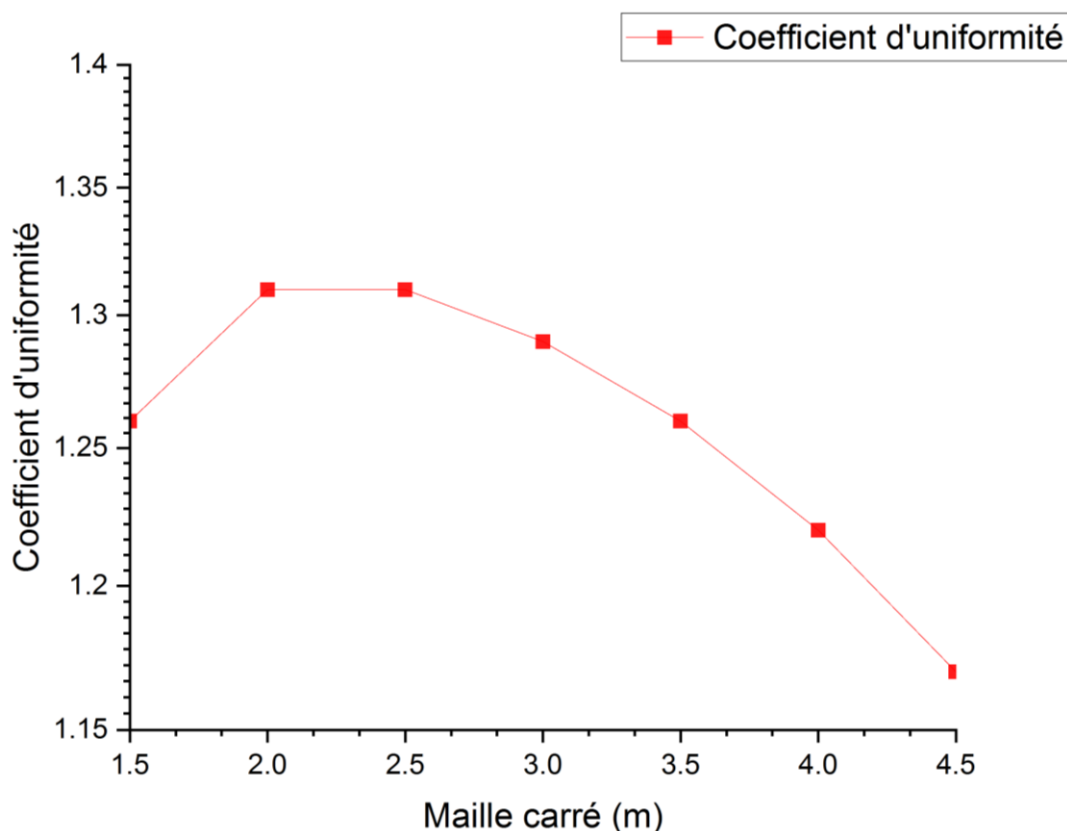


Fig. IV.3. Courbes obtenues représentant les valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille carrée.

La courbe indique que l'indice d'uniformité diminue à mesure que les dimensions de la maille utilisée augmentent. Par ailleurs, sa valeur optimale est atteinte avec l'utilisation d'une maille carrée de dimension 2,5 m.

IV.1.3 Maille rectangulaire

La maille rectangulaire est l'opposé de la maille carrée : la distance entre les trous diffère de celle entre les rangées.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux (voir annexe 6) et de courbes, qui montre le pourcentage de passants en fonction des dimensions des tas de roches abattues lorsque le modèle Kuz-Ram utilise une maille rectangulaire.

Les courbes de la figure IV.4 illustrent la distribution granulométrique des roches fragmentées après le tir, dans le cas où une maille rectangulaire est utilisée.

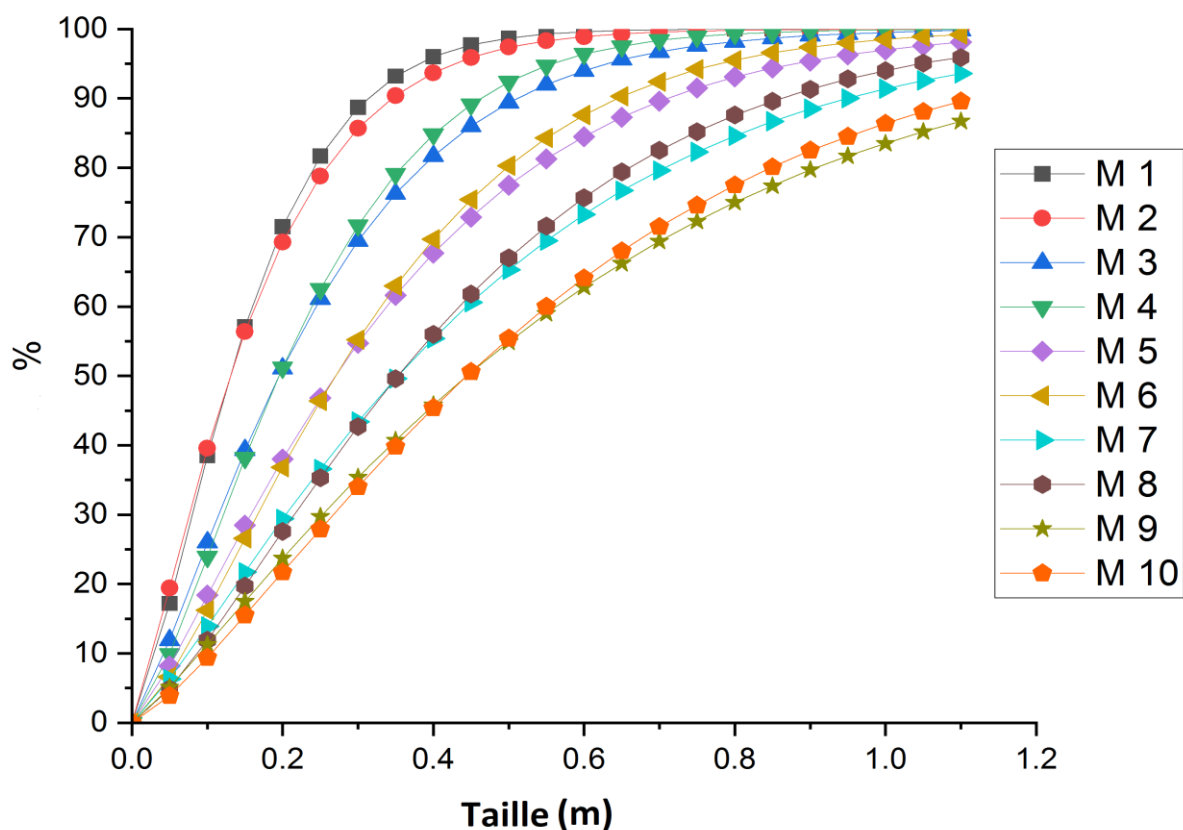


Fig. IV.4. Courbes de la distribution granulométrique obtenue dans le cas d'utilisation d'une maille rectangulaire.

Les courbes indiquent que la maille 4, avec un espacement de 2.5 m et une distance entre les rangées de 2 m, offre la meilleure distribution granulométrique.

Le tableau suivant présente les valeurs cibles et prévues du calcaire fragmenté par l'explosif dans le cadre de l'application d'une maille rectangulaire.

Tableau. IV.3. Valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenue dans le cas d'utilisation d'une maille rectangulaire.

Taux de fragmentation, %	Maille rectangulaire (E/B), m									
	2/1,5	1.5/2	2/2,5	2.5/2	3/2,5	2.5/3	3/3,5	3.5/3	3.5/4	4/3,5
Très grand (indésirable)	0.0	0.2	1.8	0.7	4.5	6.9	15.4	12.4	25.0	22.5
Optimal (ciblé)	82.8	80.5	86.3	89.4	89	84.8	78.4	82.7	69.9	73.6
Très petits (fines)	17.2	19.4	11.9	9.9	6.6	8.2	6.3	4.9	5.1	3.9

D'après les valeurs cibles et prévues des fragments obtenus lors de l'utilisation d'une maille rectangulaire, la distribution granulométrique varie considérablement en fonction des dimensions choisies. La meilleure répartition de la granulométrie moyenne des fragments, des blocs hors gabarit et des particules fines est obtenue avec une maille rectangulaire de dimensions : espacement de 2.5 m et une distance entre les rangées de 2 m.

Le tableau suivant présente les valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille rectangulaire.

Tableau. IV.4. Valeurs du coefficient d'uniformité en fonction des dimensions de la maille rectangulaire.

Dimensions, m	2/1,5	1.5/2	2/2,5	2.5/2	3/2,5	2.5/3	3/3,5	3.5/3	3.5/4	4/3,5
Coefficient d'uniformité	1.37	1.23	1.25	1.39	1.38	1.34	1.21	1.36	1.18	1.30

Le tableau IV.4 montre que la valeur de l'indice d'uniformité varie considérablement en fonction des dimensions de la maille utilisée. La valeur optimale est obtenue avec une maille rectangulaire de dimensions : espacement de 2m et une distance entre les rangées de 2.5 m.

IV.1.4 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent une relation proportionnelle entre la taille des fragments et les dimensions de la maille utilisée. Ainsi, pour obtenir une bonne fragmentation avec une maille carrée, il est nécessaire de forer les trous selon les dimensions suivantes : distance entre les rangées de 2,5 m et espacement de 2,5 m. Dans le cas d'une maille rectangulaire, les dimensions optimales sont une distance entre les rangées de 2 m et un espacement de 2.5 m.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec la maille carrée, mais celle-ci présente des limites, principalement liées à l'adéquation de l'explosif lorsque la distance entre les trous et les rangées augmentent. En effet, lorsque les dimensions de la maille augmentent, les performances de tir diminuent, car les ondes de choc n'atteignent pas le centre de la maille, qui se fissure uniquement.

IV.2 Étude et analyse de la granulométrie du calcaire fragmenté provenant de la carrière de granulats d'Héliopolis

L'objectif principal du tir est d'obtenir une fragmentation optimale tout en évitant les nuisances induites, telles que la fissuration du massif rocheux, les projections et les ondes sismiques. De plus, cette fragmentation doit faciliter la récupération du matériau par les machines d'extraction.

Cependant, si l'opération de tir génère un taux élevé de blocs hors gabarit, un débitage secondaire devient alors nécessaire. Celui-ci peut être réalisé soit par l'utilisation d'une quantité supplémentaire d'explosif, soit par des moyens mécaniques, comme un brise-roche.

Cette étape supplémentaire entraîne une augmentation du coût du processus d'abattage et retarde les phases suivantes du processus.

Un matériau mal fragmenté est plus difficile à charger, ce qui impacte négativement les performances des équipements de chargement et de transport. Cela entraîne, d'une part, une diminution de la productivité de la carrière et, d'autre part, une usure accélérée des machines d'extraction.

Il est donc essentiel de définir et d'optimiser correctement les paramètres suivants du plan de tir :

- Paramètres géométriques : profondeur, inclinaison, diamètre, charge, espacement des trous et des rangées, nombre de trous et de rangées, forme de la disposition des trous.
- Charge des trous : nature et quantité des explosifs utilisés.
- Séquences d'initiation : ordre et méthode d'allumage des charges.
- Distribution granulométrique : caractéristiques des roches fragmentées après l'opération de tir.

Un nouveau modèle de tir a été développé en utilisant la méthode de Langefors, reconnue pour sa grande maniabilité. Ses résultats sont satisfaisants et efficaces, car cette méthode permet d'intégrer un maximum d'éléments sans nécessiter de moyens de calcul puissants. Contrairement à certains logiciels qui reposent sur des routines mathématiques complexes, telles que le calcul par éléments finis ou par itérations, la méthode de Langefors offre une approche plus accessible et performante.

Cette recherche applique le modèle empirique Kuz-Ram pour analyser la distribution granulométrique de trois modèles de tir sur une roche calcaire provenant de la carrière d'Héliopolis-Guelma.

IV.2.1 Analyse de la granulométrie des roches fragmentées à l'aide du modèle Kuz-Ram

Le forage constitue une étape fondamentale de l'extraction minière. Dans le premier plan de tir, 35 trous inclinés à 80° sont creusés en deux rangées, avec un espacement de 1,80 m et une banquette de 2,5 m. Chaque trou est chargé de manière continue avec 17,5 kg de Marmanit III comme charge d'amorçage, ainsi que 25 kg d'Anfomil et 24 kg de Timex comme charge principale.

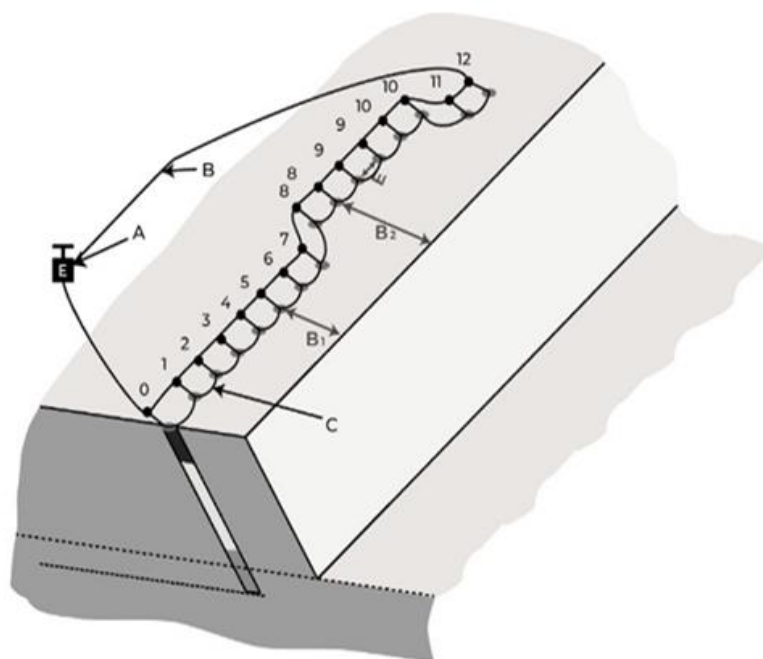
Les travaux de forage pour la deuxième opération de tir consistent à creuser 19 trous inclinés à 80°, avec un espacement de 4 m et une banquette de 3 m. Les trous sont chargés de manière discontinue avec 15 kg de Marmanit III comme charge d'amorçage et 37,5 kg d'Anfomil comme charge principale.

Dans le troisième plan de tir, les travaux de forage ont préparé 16 trous inclinés à 80°, d'un diamètre de 89 mm et d'une profondeur de 13,5 m, avec un espacement de 1,90 m et une banquette variable. Huit de ces trous ont une banquette de 2 m. Cependant, en raison du problème de fissuration du massif rocheux dans la zone non régulée (Fig. IV.5) du tir précédent, le forage est devenu particulièrement difficile. Dans ce cas, il est nécessaire

d'augmenter la banquette à 3 m, mais uniquement pour six trous, avec un espacement réduit à 1,75 m. Les deux derniers trous conservent les mêmes caractéristiques que les huit premiers (Fig. IV.6).



Fig. IV.5. Zone non régulée excessivement fissurée.



*Fig. IV.6. Schéma de la troisième opération de tir avec explosif :
0 – Détonateur électrique instantané ; A – Exploseur ; B – Fil électrique ; C – Cordeau détonant ; E – Espacement ; 1–12 – Détonateur à microretard = 20 ms*

Pour effectuer une analyse granulométrique du troisième tir, il est impératif de le diviser en deux parties.

La première partie comprend une banquette B_1 de 2 m, tandis que la deuxième partie repose sur une banquette B_2 de 3 m (Fig. IV.6). Les trous de forage sont chargés avec 7,5 kg de Marmanit III comme charge d'amorçage, ainsi que 25 kg d'Anfomil et 36 kg de Timex

comme charge principale. En revanche, pour la deuxième partie, les trous sont chargés avec 2,5 kg de Marmanit III comme charge d'amorçage, accompagnés de 25 kg d'Anfomil et 36 kg de Timex comme charge principale.

L'objectif principal de l'abattage est d'obtenir une distribution granulométrique optimale afin de faciliter la récupération du matériau par les équipements miniers. Il est donc essentiel de définir un plan de tir en optimisant les paramètres géométriques, la nature et la quantité d'explosifs, ainsi que les séquences d'initiation. Afin d'améliorer la qualité de la fragmentation du calcaire de la carrière de granulats d'Héliopolis – Guelma, un nouveau plan de tir (Fig. IV.7) a été élaboré selon la méthode Langefors. Cette approche consiste à forer 14 trous verticaux, répartis sur deux rangées avec un espacement de 3,35 m, une banquette et distance entre les rangées de 2,68 m. Chaque trou est chargé en continu avec 25,89 kg de Marmanit III comme charge d'amorçage, ainsi que 30,16 kg d'Anfomil comme charge principale.

IV.2.2 Calcul des paramètres du plan de tir proposé par la méthode de Langefors

- **Banquette maximale;** Langefors et Kihlström, ont établi une règle empirique de calcul de la banquette maximale admissible en fonction de paramètres inhérents au massif rocheux (notion de résistance de la roche), paramètres relatifs à la maille souhaitée (rapport espacement sur banquette, diamètre de foration, inclinaison) et du type d'explosifs employés. [67]

$$B_{\max} = \frac{d_t}{33} \sqrt{\frac{P \cdot \rho}{f_c \cdot f \cdot E/B}}, m$$

Où :

d_t : Diamètre du trou, mm

p : Densité d'explosif au fond du trou, kg/m³

ρ : Coefficient de puissance d'explosif au pied (WeightStrength)

$f_c = R + 0,05$

R : Résistance au tirage de la roche, kg/m³

f : Facteur de contrainte dépendant de l'inclinaison du trou (est égale à 1 pour un trou vertical)

E/B : Rapport de la maille, espacement/banquette=1,25

La formule simplifiée de Langefors :

Pour L'ANFO : $B_{\max} = 1,36 \sqrt{l_b \cdot f_1 \cdot f_2}, m$

Tableau. IV.5. Correction de la banquette maximale en fonction de diamètres du trou

Angle d'inclinaison du trou, (°)	90	84	79	72	64	45
f_1	0,95	0,96	0,98	1,00	1,03	1,10

Tableau. IV.6. Correction de la banquette maximale en fonction de la résistance au tirage

R	0,3	0,4	0,5
f_2	1,15	1,00	0,90

l_b : Charge linéaire au fond du trou, kg/m

$$l_b = 0,785.d_t^2.p, kg / m$$

Pour notre calcul nous avons choisi le trou vertical, alors f_1 0,95 (Tableau. IV.7)

Dans le cas d'un terrain homogène, le coefficient de résistance au tirage est de :

- 0,35 pour des roches élastiques.
- 0,40 pour des roches moyennes.
- 0,45 pour des roches plastiques.

Puisque le calcaire de la carrière de Bouzitoune est de comportement moyen, alors

$R = 40$ donc $f_2 = 1$ (Tableau. IV.8)

D'après les caractéristiques techniques de la sondeuse utilisée pour le forage des trous au niveau de la carrière d'Héliopolis, le diamètre des trous forés est de 89 mm

D'après les caractéristiques techniques du Marmanit 3, $P = 1g/cm^3$ (Tableau. III.3)

Alors

$$l_b = 0,785.(0,089)^2.1000 = 6,21kg / m$$

Donc

$$B_{max} = 1,36\sqrt{6,21.0,95.1} = 3,21m$$

- **La longueur d'excès de forage;** est calculée par la formule suivante :

$$l_s = 0,3.B_{max} = 0,3.3,21 = 0,96m$$

- **La longueur du trou;** Pour les trous verticaux, elle est calculée par la formule suivante

$$L_{tr} = H_g + l_s = 14 + 0,96 = 14,96m$$

D'après les données de la carrière de Bouzitoune $H_g=14m$.

- **Erreur du forage**

Il faut tenir compte du fait qu'il est impossible de forer un trou exactement selon les calculs théoriques. La précision du forage est affectée par les machines utilisées ainsi que par l'habileté du conducteur. Par conséquent, l'erreur ne doit pas dépasser (D), calculée conformément à la formule ci-dessous.

$$D = \frac{d_t}{1000} + (0,03.L_{tr}) = \frac{89}{1000} + (0,03.14,96) = 0,53m$$

- **Banquette pratique;** est calculée par la formule suivante

$$B = B_{\max} - D = 3,21 - 0,53 = 2,68m$$

$$\text{Donc } B = 2.5m$$

- **Espacement** (distance entre les trous de même rangée); est calculé par la formule suivante

$$E = 1,25.B = 1,25.2,68 = 3,35m$$

$$\text{Donc } E = 3m$$

- **La hauteur de la charge d'amorçage** ; est calculée par la formule suivante

$$L_a = 1,3.B_{\max} = 1,3.3,21 = 4,17m$$

- **La hauteur du bourrage** ; est calculée par la formule suivante

$$L_{bb} = B = 2,68m$$

- **La hauteur de la charge principale** ; est calculée par la formule suivante

$$L_p = L_{tr} - L_a - L_{bb} = 14,96 - 4,17 - 2,68 = 8,11m$$

- **Quantité d'explosif de la charge d'amorçage (Marmanit 3)**; est calculée par la formule suivante

$$Q_a = L_a.l_b = 4,17.6,21 = 25,89kg$$

- **Quantité d'explosif de la charge principale** ; est calculée par la formule suivante

$$Q_p = L_p.L_c = 8,11.3,72 = 30,16kg$$

$$\text{Avec } L_c = 40\text{à}60\%l_b = 0,6.6,21 = 3,72kg / m$$

Ou : L_c : la charge linéaire de l'explosif principale (Anfomil), kg/m

- **Quantité d'explosif dans un trou** ; est calculée par la formule suivante

$$Q_{tr} = Q_a + Q_p = 25,89 + 30,16 = 56kg$$

- **Volume de la roche abattu par un trou** ; est calculé par la formule suivante

$$V = H_g.B.E = 14.2,68.3,35 = 125,7m^3$$

Et la quantité de la roche abattue par un trou est égale au volume de la roche abattu multiplié par la masse volumique du calcaire

$$Q_r = V.\gamma = 125,7.2,7 = 339,39tonnes$$

- **Consommation spécifique d'explosif** ; est calculée par la formule suivante

$$q = \frac{Q_{tr}}{V} = \frac{56}{125,7} = 0,44kg / m^3$$

La maille retenue dans le plan de tir proposé par cette recherche est la maille en quinconce, et il est illustré dans la figure suivante.

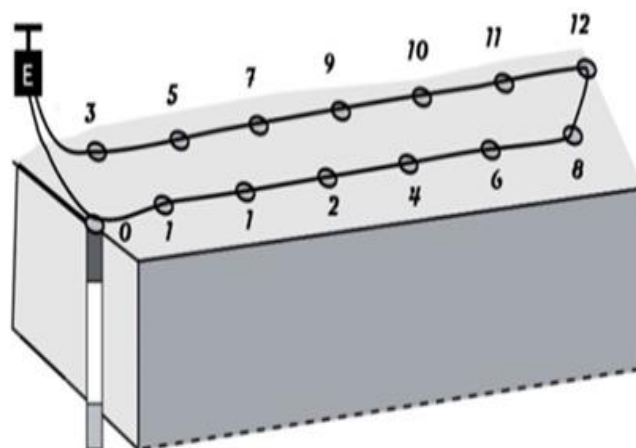


Fig. IV.7. Schéma du plan de tir proposé

Les paramètres des plans de tir réalisés par les ingénieurs de la carrière de granulats d'Héliopolis, ainsi que ceux du plan proposé, sont consignés dans le tableau IV.7.

Tableau. IV.7. Récapitulatif des paramètres des plans des tirs existants et proposé.

Paramètres de tir	tir-1	tir-2	tir-3a	tir-3b	tir-4 proposé
Banquette, m	2.5	3	2	3	2.68
Espacement, m	1.80	4	1.90	1.75	3.35
Hauteur du gradin, m	13	15	13	13	14
Diamètre de trou, mm	89	89	89	89	89
Nombre de rangées	2	1	1	1	2
Distance entre les rangées, m	1.80	-	-	-	2.68
Longueur de bourrage intermédiaire, m	-	0.80	-	-	-
Inclinaison du trou, (°)	80	80	80	80	90
Nombre de trous	35	19	10	6	14
Quantité d'explosif par trou, kg	66.5	52.5	63.5	68.5	56
Anfomil, kg	25	37.5	25	25	30.16
Timex 50, kg	24	-	36	36	-
Marmanit III, kg	17.5	15	2.5	7.5	25.89
Volume abattu par trou, m ³	58.5	180	52.28	72.24	125.7
Charge spécifique, kg/m ³	1.13	0.29	1.21	0.94	0.44

IV.2.3 Caractéristiques des explosifs utilisés dans les explosions étudiées

Dans cette section, nous avons analysé l'influence de certaines propriétés des explosifs employés au sein de la carrière de granulats d'Héliopolis, notamment :

IV.2.3.1 Densité de l'explosif utilisé

La densité de l'explosif est une caractéristique essentielle qui peut influencer la réussite d'un travail à l'explosif. Elle est exprimée en g/cm^3 .

Lors du premier abattage, les trous sont chargés avec trois types d'explosifs : Anfomil, Timex 50 et Marmanit III. Avant de déterminer la densité, il est nécessaire de calculer le pourcentage de chaque type d'explosif.

- Pourcentage d'Anfomil

$$Anf\% = \frac{Q_{Anf} \times 100}{Q_t} = \frac{25 \times 100}{66,5} = 37,59\%$$

- Pourcentage du Timex

$$Tim\% = \frac{Q_{Tim} \times 100}{Q_t} = \frac{24 \times 100}{66,5} = 36,1\%$$

- Pourcentage du Marmanit

$$Mar\% = \frac{Q_{Mar} \times 100}{Q_t} = \frac{17,5 \times 100}{66,5} = 26,31\%$$

Ou :

Q_{Anf} : Quantité d'Anfomil par trou, kg

Q_{Tim} : Quantité du Timex50 par trou, kg

Q_{Mar} : Quantité du Marmanit3 par trou, kg

Q_t : Quantité totale d'explosif par trou, kg

Donc la densité sera calculée par la formule suivante :

$$\Delta 1 = \frac{(Anf\% \times \Delta_{Anf}) + (Tim\% \times \Delta_{Tim}) + (Mar\% \times \Delta_{Mar})}{100}$$
$$\Delta 1 = \frac{(37,5 \times 0,85) + (36,1 \times 1,22) + (26,31 \times 1)}{100} = 1,023 \text{ g/cm}^3$$

Ou:

Δ_{Anf} : Densité d'Anfomil, (Tableau. III. 3)

Δ_{Tim} : Densité du Timex50, (Tableau. III. 3)

Δ_{Mar} : Densité du Marmanit3, (Tableau. III. 3)

Le tableau suivant présente les pourcentages de chaque type d'explosif utilisé dans les plans de tir étudiés et dans le plan proposé.

Tableau. IV.8. Pourcentages des explosifs utilisés dans la carrière de granulats d'Héliopolis.

Type d'explosif	Pourcentages des explosifs, %				
	Tir-1	Tir-2	Tir-3a	Tir-3b	Tir-4 proposé
Anfomil	37,5	71,42	36,44	39,37	53,85
Marmanit3	26,31	28,58	10,93	3,93	46,23
Timex50	36,1	-	52,47	56,69	-

IV.2.3.2 La puissance relative de l'explosif

La puissance relative d'un explosif se définit par l'énergie libérée lors de la détonation ainsi que par sa capacité à effectuer un travail donné. Lors du premier abattage, la puissance relative de l'explosif est calculée comme suit :

$$RWS = \frac{(Anf\% \times RWS_{Anf}) + (Mar\% \times RWS_{Mar}) + (Tim\% \times RWS_{Tim})}{100}, \%$$

$$RWS = \frac{(37,5 \times 80) + (26,31 \times 75) + (36,1 \times 16)}{100} = 55,58\%$$

Ou:

RWS_{Anf} : Puissance relative de l'Anfomil, % (Tableau.III. 3)

RWS_{Mar} : Puissance relative du Marmanit3, % (Tableau.III. 3)

RWS_{Tim} : Puissance relative de Timex50, % (Tableau III. 3)

IV.2.3.3 Vitesse de détonation nominale de l'explosif

La vitesse de détonation d'un explosif correspond à la vitesse à laquelle le front de l'onde de détonation se propage. Pour le premier abattage, la vitesse de détonation nominale de l'explosif sera calculée à l'aide de la formule suivante :

$$VOD_n = \frac{(Anf\% \times VOD_{Anf}) + (Mar\% \times VOD_{Mar}) + (Tim\% \times VOD_{Tim})}{100}, m/s$$

$$VOD_n = \frac{(37,5 \times 2600) + (26,31 \times 4200) + (36,1 \times 4500)}{100} = 3706,85 m/s$$

Ou:

VOD_{Anf} : Vitesse de détonation nominale de l'Anfomil, m/s (Tableau. III.3)

VOD_{Mar} : Vitesse de détonation nominale de Marmanit3, m/s (Tableau. III.3)

VOD_{Tim} : Vitesse de détonation nominale de Timex50, m/s (Tableau. III.3)

Les mêmes calculs ont été réalisés pour le deuxième, le troisième, et le quatrième abattage. Les résultats sont enregistrés dans le Tableau IV.9.

Tableau. IV.9. Récapitulatif des valeurs des caractéristiques des explosifs utilisés

Caractéristiques d'explosifs	Tir-1	Tir-2	Tir-3a	Tir-3b	Tir-4 proposé
Densité	1,023	0,89	1,05	1,06	0,92
RWS,%	55,58	78,57	45,74	43,51	77,75
VOD _n , m/s	3706,85	3057,28	3767,65	3739,73	3341,76

IV.2.4 Etude de l'influence des caractéristiques d'explosif sur la qualité de la fragmentation

IV.2.4.1 La densité de l'explosif

Le tableau IV.10 et la figure IV.8 illustrent la distribution granulométrique en fonction de la densité de l'explosif utilisé. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la densité de l'explosif entraîne une hausse du pourcentage de particules fines et une diminution du pourcentage de blocs hors gabarit. À l'inverse, lorsque la densité diminue, le pourcentage de blocs hors gabarit augmente tandis que celui des particules fines diminue. La meilleure distribution granulométrique est obtenue avec un explosif ayant une densité de 0,92 g/cm³, valeur retenue dans le plan proposé. Nous observons une relation inverse entre la densité de l'explosif et le pourcentage de blocs hors gabarit, mais une relation directe entre la densité et le pourcentage de particules fines.

Tableau.IV.10. Récapitulatif des valeurs de la densité et de la distribution granulométrique obtenue après le tir.

Densité, g/cm ³	Hors gabarit, %	Optimal, %	Fines, %
0.89	24.3	71.8	3.8
0.92	5.1	89.2	5.7
1.023	1.5	85.0	13.5
1.05	2.8	84.4	12.8
1.06	0.0	85.5	14.4

La figure suivante illustre la distribution granulométrique du tas de roches abattues en fonction de la densité de l'explosif utilisé.

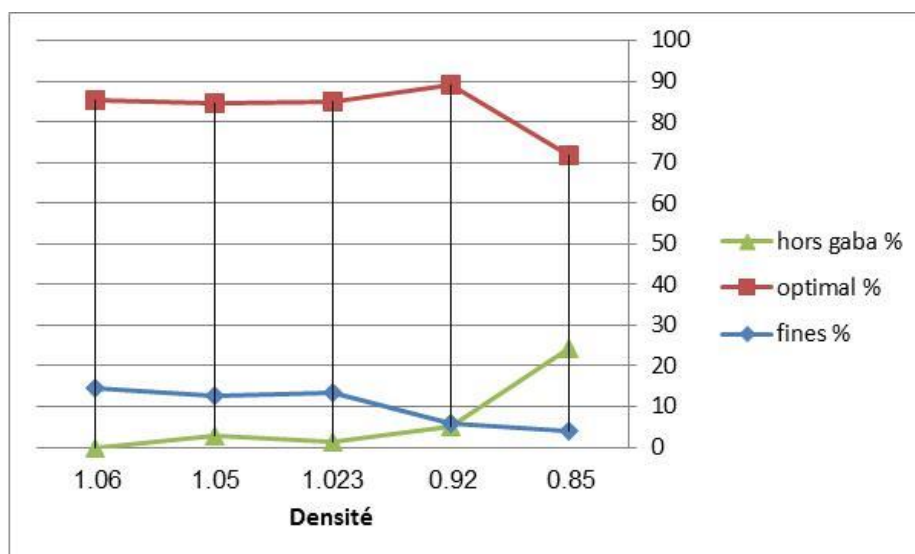


Fig. IV.8. Distribution granulométrique en fonction de la densité de l'explosif

IV.2.4.2 La puissance relative de l'explosif

Le tableau IV.11 et la figure IV.9 illustrent la distribution granulométrique en fonction de la puissance relative de l'explosif utilisé. Les résultats obtenus montrent que lorsque la puissance relative de l'explosif diminue, le pourcentage de particules fines augmente tandis que le pourcentage de blocs hors gabarit diminue. À l'inverse, une augmentation de la puissance relative entraîne une hausse du pourcentage de blocs hors gabarit et une diminution du pourcentage de particules fines. La meilleure distribution granulométrique est obtenue avec un explosif ayant une puissance relative de 77,75 %, valeur retenue dans le plan proposé. Nous observons une relation directe entre la puissance relative de l'explosif utilisé et le pourcentage de blocs hors gabarit, tandis que cette relation est inverse avec le pourcentage de particules fines.

Tableau. IV.11. Récapitulatif des valeurs de la puissance relative de l'explosif et de la distribution granulométrique obtenue après le tir.

RWS, %	Hors gabarit, %	Optimal, %	Fines, %
43.51	0.0	85.5	14.4
45.74	2.8	84.4	12.8
55.58	1.5	85	13.5
77.75	5.1	89.2	5.7
78.57	24.3	71.8	3.8

Les graphes suivants illustrent les différents pourcentages de fragmentation obtenus en fonction de la puissance relative de l'explosif chargé.

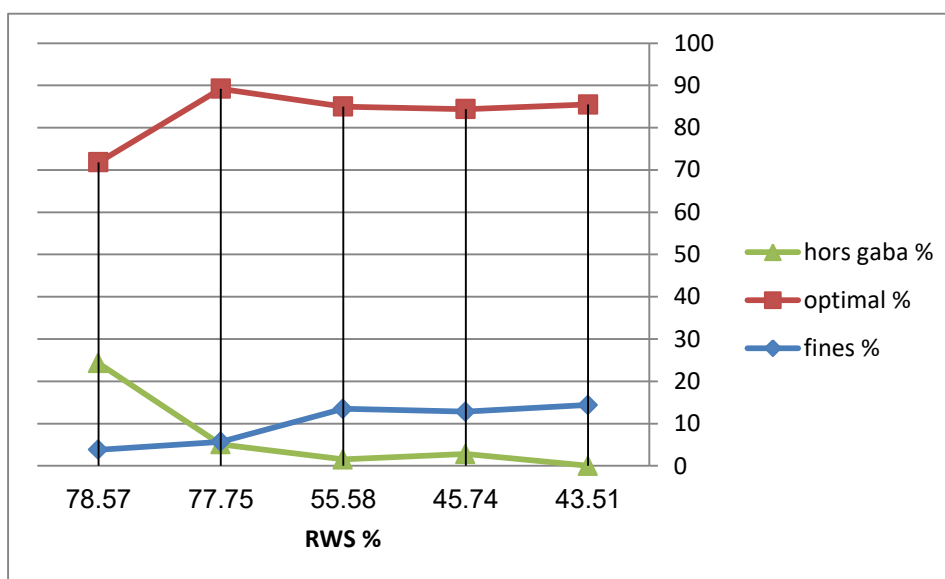


Fig. IV.9. Distribution granulométrique en fonction de la puissance relative de l'explosif.

IV.2.4.3 Vitesse de détonation nominale de l'explosif

Le tableau IV.12 et la figure IV.10 illustrent la distribution granulométrique en fonction de la vitesse de détonation nominale de l'explosif utilisé. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de cette vitesse entraîne une hausse du pourcentage de particules fines et une diminution du pourcentage de blocs hors gabarit. À l'inverse, lorsque la vitesse de détonation nominale diminue, le pourcentage de blocs hors gabarit augmente tandis que celui des particules fines diminue.

La meilleure distribution granulométrique est obtenue avec un explosif ayant une vitesse de détonation nominale de 3341,76 m/s, valeur retenue dans le plan proposé. Ainsi, on observe une relation inverse entre la vitesse de détonation nominale et le pourcentage de blocs hors gabarit, tandis que cette relation est directe avec le pourcentage de particules fines.

Tableau. IV.12. Récapitulatif des valeurs de la vitesse de détonation nominale de l'explosif et de la distribution granulométrique obtenue après le tir.

VOD, m/s	Hors gabarit%	Optimal%	Fines%
3706.85	1.5	85	13.5
3057.28	24.3	71.8	3.8
3767.65	2.8	84.4	12.8
3739.73	0.0	85.5	14.4
3341.76	5.1	89.2	5.7

Les graphes suivants illustrent les différents pourcentages de fragmentation obtenus en fonction de la vitesse de détonation nominale de l'explosif chargé dans les trous.

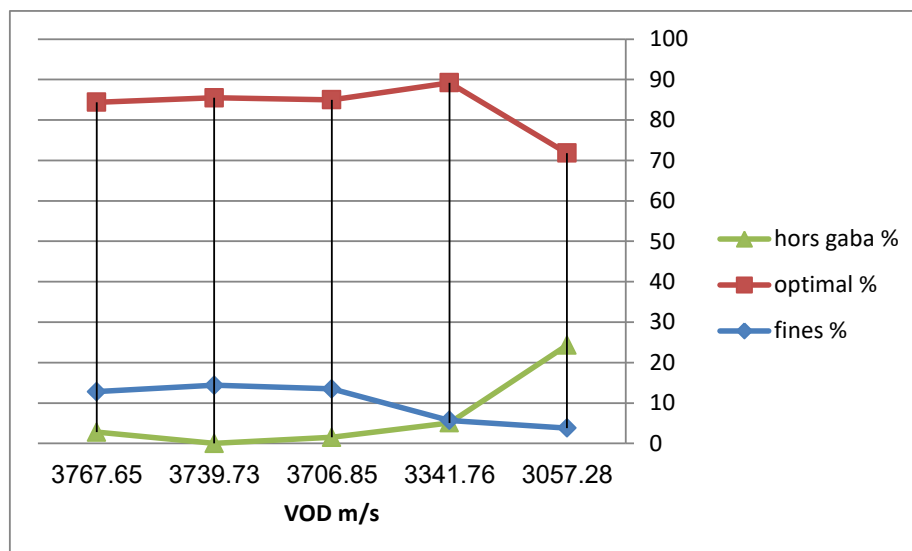


Fig. IV.10. Distribution granulométrique en fonction de la vitesse de détonation nominale de l'explosif.

Les photos suivantes (Fig. IV.11) illustrent les résultats obtenus après chaque opération de tir à l'explosif dans la carrière de granulats d'Héliopolis, Guelma.



Fig. IV.11. Roches fragmentées après chaque opération de tir (a – première opération ; b – deuxième opération ; c – troisième opération ; d – plan de tir proposé).

Les pourcentages de la distribution granulométrique et les paramètres de fragmentation des roches obtenus après chaque tir sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau. IV.13. Valeurs cibles et prévues de la fragmentation de la roche obtenues après les opérations de tir étudiées et l'opération de tir proposée (B-4).

Fragmentation	fragmentation ciblée (m)	fragmentation prédite (%)				
		B-1	B-2	B-3a	B-3b	B-4
Très grand (indésirable)	0.8	1.5	24.3	2.8	0.0	5.1
Optimal (ciblé)	0.4	85	71.8	84.4	85.5	89.2
Très petits (fines)	0.05	13.5	3.8	12.8	14.5	5.7

Tableau. IV.14. Paramètres de fragmentation de la roche obtenue après les opérations de tir étudiées et l'opération de tir proposée (B-4).

Paramètres	B-1	B-2	B-3a	B-3b	B-4
Indice de tirabilité	7.9502	7.9502	7.9502	7.9502	7.9502
Taille moyenne des fragments	18 cm	46 cm	20 cm	14 cm	29 cm
Coefficient d'uniformité	1.21	1.29	1.18	1.40	1.42
Taille caractéristique(D ₆₀)	0.24m	0.61m	0.27m	0.19m	0.37m

Les courbes suivantes (Fig. IV.12) illustrent la distribution granulométrique des roches fragmentées obtenues après les opérations de tir étudiées et l'opération de tir proposée.

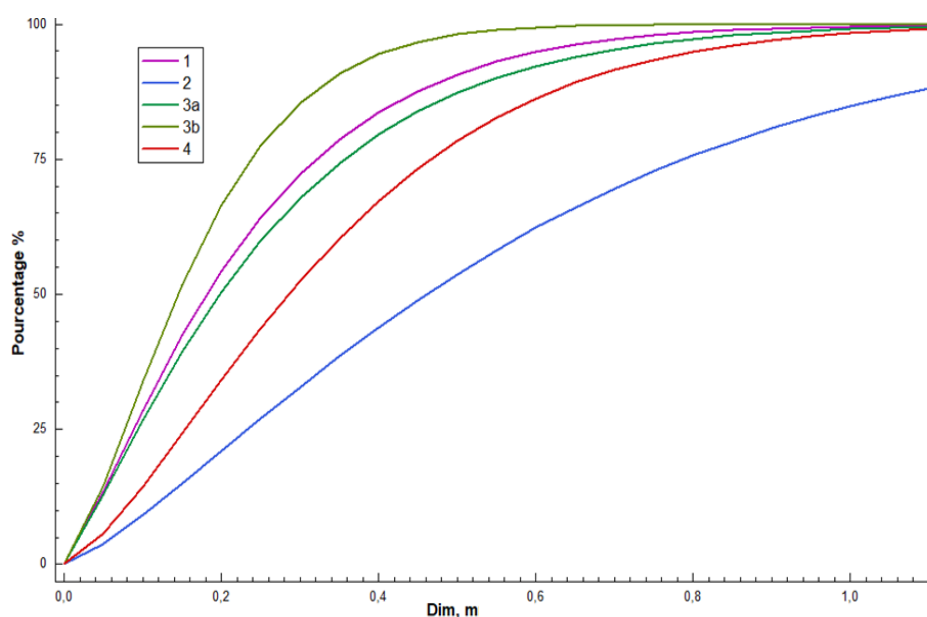


Fig. IV.12. Courbes obtenues de la distribution granulométrique après les opérations de tir (1 – premier tir ; 2 – deuxième tir ; 3a et 3b – troisième tir ; 4 – tir proposé).

IV.2.4.4 Résultats et discussion

Toutes les recherches ont été orientées vers l'étude de l'influence des discontinuités naturelles de la masse rocheuse sur la fragmentation des roches par les explosifs. Cependant, la majorité des fissures sont générées par l'opération de tir elle-même (effet arrière), ce qui réduit les performances de l'explosion en permettant l'échappement des gaz à travers ces fissures. Cette étude vise donc à améliorer l'efficacité du tir dans la carrière de calcaire d'Héliopolis, afin d'optimiser la production tout en minimisant les dépenses d'extraction. Par ailleurs, elle cherche à limiter la fissuration de la masse rocheuse après le tir en augmentant le nombre de surfaces libres pour chaque trou et en adoptant une séquence d'initiation appropriée (Fig. IV.6 et Fig. IV.14).

Lorsqu'un explosif détone, une onde de choc se produit et se propage du centre du trou de tir vers la périphérie, générant des tensions radiales et tangentielles dans la roche. Une fois que l'onde de choc atteint la surface libre, elle se réfléchit, entraînant une fissuration efficace de la masse solide autour du trou. Ainsi, ces surfaces libres jouent le rôle de barrière, stoppant la propagation de l'onde de choc dans la masse rocheuse du tir suivant.

En pratique, la détonation d'un explosif nécessite la création d'une onde explosive à son contact, obtenue à l'aide d'un détonateur électrique ou d'un cordeau détonant. Dans le cas des charges allongées, le mode d'amorçage joue un rôle essentiel.

Le détonateur électrique permet d'initier l'explosion d'une charge allongée soit depuis sa base, soit depuis son sommet. En revanche, avec un cordeau détonant, l'impulsion est toujours perçue au sommet de la charge. Ainsi, l'onde explosive se propage du haut vers le bas du gradin, alors que dans la plupart des cas, on cherche à obtenir l'effet inverse, qui permet une réflexion complète de l'onde de choc.

Dans le cas de la carrière d'Héliopolis, la charge d'amorçage (Marmanit), reliée au cordeau détonant, fournirait l'impulsion nécessaire à la charge principale (Anfomil). Dans cette configuration, le cordeau détonant transmet l'onde explosive quasiment simultanément aux deux explosifs utilisés. Ainsi, l'espoir que la Marmanit initie l'Anfomil est vain.

Le meilleur résultat serait obtenu si la charge principale était amorcée par la charge d'amorce. Une solution envisageable consisterait à introduire le cordeau détonant à l'intérieur d'un tube isolant. Dans ce cas, l'Anfomil, n'étant pas en contact direct avec le cordeau, serait initié par la Marmanit, ce qui permettrait d'obtenir une détonation franche et des effets optimaux pour une bonne fragmentation.

Selon les résultats enregistrés dans le tableau IV.13, une variation des pourcentages de fragments indésirables et fins est observée. Cette variation dépend du type et de la quantité d'explosif utilisé, de la forme et de l'espacement des trous, du mode d'initiation employé ainsi que du degré de fissuration de la masse rocheuse à abattre. Les résultats obtenus lors du premier tir indiquent un faible pourcentage de blocs hors gabarit (1,5 %), mais un pourcentage significatif de particules fines (13,5 %). Chaque trou a été chargé avec une quantité de 66,5 kg d'explosif, composé d'un mélange d'Anfomil, Timex et Marmanit, permettant l'abattage d'un

volume de 58,5 m³ par trou. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'augmenter la distance entre les trous et les rangées, tout en minimisant la quantité d'explosif chargée par trou, en excluant l'explosif Timex.

Concernant le deuxième tir, la situation est inversée : la granulométrie obtenue révèle un pourcentage élevé de fragments indésirables (24,3 %) mais un faible pourcentage de particules fines (3,8 %). Dans ce cas, chaque trou est chargé avec 52.5 kg de deux types d'explosifs (Anfomil et Marmanit), permettant l'abattage d'un volume de 180 m³ par trou.

Lors du troisième tir, un problème majeur est survenu pendant les travaux de forage en raison de la fissuration importante du massif en place. Afin d'identifier le paramètre essentiel influençant les résultats obtenus, le plan de tir a été divisé en deux parties : la première avec une banquette de 3 m, et la deuxième avec une banquette de 2 m. Un mélange de trois types d'explosifs (Marmanit III, Timex et Anfomil) a été utilisé, avec une quantité de 63.5 kg/trou pour la première partie et 68.5 kg/trou pour la seconde, permettant de fragmenter successivement un volume de 72,24 m³ et 52,28 m³ de calcaire.

Les résultats montrent que le pourcentage de blocs indésirables dans la première partie est de 2,8 %, alors qu'il est nul dans la seconde. Les pourcentages de fines sont de 12,8 % et 14,5 % respectivement pour la première et la deuxième partie. Cette opération de dynamitage a cependant produit des résultats médiocres, notamment une fragmentation insuffisante et un taux élevé de particules fines. De plus, elle a généré des fissures (effets arrière, voir Fig.IV.13) dans la masse rocheuse du trou 14 (Fig.IV.6), en raison de la grande quantité d'explosif utilisée et du choix inadapté de la séquence de tir.



Fig. IV.13. Fissures créées après le tir (effets arrière).

La solution adéquate à ce problème repose sur trois actions principales :

- Créer une surface libre en modifiant la séquence de tir (Fig. IV.14).
- Exclure l'explosif Timex, afin que les trous soient chargés uniquement avec deux types d'explosifs (Anfomil et Marmanit III).
- Augmenter l'espacement entre les trous, pour optimiser la fragmentation.

Afin de minimiser au maximum les effets arrière causés par un tir excessif, une méthode de tir est utilisée, consistant à créer une fissure dans la masse rocheuse du plan suivant avant

toute action de tir. Il est recommandé de réaliser des trous préliminaires afin de régler le profil qui sera tracé avant les trous de tir proprement dits. Cette approche permet de couper la roche selon l'alignement des trous, sans générer d'effet arrière ni de déplacement significatif du terrain. Dans ce cas, les trous sont rapprochés et ne contiennent qu'une faible quantité d'explosif.

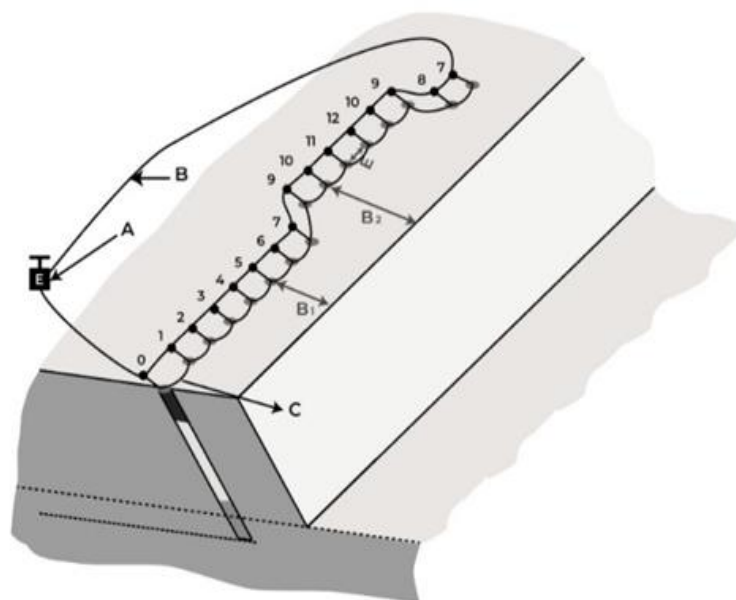


Fig. IV.14. Séquence d'initiation proposée pour la troisième opération de tir
(0 – Détonateur électrique instantané ; A – Explosif ; B – Fil électrique ; C – Cordeau détonant ; E – Espacement ; 1–12 – Détonateur à microretard = 20 ms).

IV.3 Conclusion

Une fragmentation efficace constitue l'objectif principal de toute entreprise minière. Pour l'atteindre, il est essentiel d'analyser les paramètres influençant quantitativement et qualitativement les résultats d'un tir, notamment les caractéristiques de la masse rocheuse et les paramètres d'un plan d'abattage.

L'amélioration des travaux miniers dans la carrière de granulats d'Héliopolis requiert l'application de nouvelles techniques d'optimisation et d'analyse, permettant la conception de plans de tir garantissant une fragmentation optimale avec des dimensions adaptées.

Les résultats d'analyse obtenus à partir du modèle empirique Kuz-Ram de fragmentation du calcaire dans la carrière de matériaux de construction d'Héliopolis indiquent une granulométrie optimale de 89,2 % avec une dimension de 400 mm, des fragments indésirables représentant 5,1 % avec une taille de 800 mm, et des particules fines à hauteur de 5,7 %, mesurant 50 mm

Pour garantir ces résultats, il convient de respecter les principes suivants :

- Opter pour une initiation ponctuelle plutôt qu'une initiation latérale.

- Charger les trous avec deux types d'explosifs : Marmanit III pour l'amorçage et Anfomil comme charge principale.
- Forer les trous verticalement au lieu de les incliner, en adoptant un maillage décalé (triangulaire).
- Sélectionner une séquence d'initiation optimale afin d'augmenter le nombre de surfaces libres par trou.

L'efficacité du tir dans cette carrière repose principalement sur le type et la quantité d'explosif utilisé, le mode d'initiation et la surface libre. Une bonne maîtrise de ces paramètres permet de réduire la fissuration de la masse rocheuse après l'opération de tir, rendant ainsi l'explosion suivante plus rentable.

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer la qualité de fragmentation des matériaux durs afin de réduire les effets indésirables liés à l'explosion, principalement la fissuration de la masse, et de minimiser les dépenses générées par le travail sur la ligne de production, notamment celles dues aux opérations de débitage secondaire.

Cela a nécessité une étude approfondie de la fragmentation, un concept complexe dans le domaine de l'extraction minière en général et des carrières de granulats en particulier, ainsi que la proposition de méthodes visant à améliorer la qualité de la distribution granulométrique. Grâce aux études menées sur les sites d'extraction de calcaire de la carrière d'Héliopolis, il a été conclu qu'un réel problème de fragmentation existait dans ce contexte, ce qui a conduit à étendre la réflexion à l'optimisation du tir à l'explosif au sein de cette carrière.

Pour atteindre notre objectif, il est nécessaire de mener une étude approfondie et d'identifier les différents facteurs influençant de manière significative les résultats d'abattage, notamment la caractérisation du massif rocheux de la carrière d'Héliopolis, qui fait partie des massifs Nord-Est de la série néritique constantinoise. Ce massif présente un milieu discontinu, et la présence de discontinuités peut avoir une grande influence sur son comportement mécanique. Ces discontinuités peuvent également aider les opérateurs à suivre l'efficacité des explosions.

La méthodologie adoptée consiste tout d'abord à recueillir les données pratiques d'un plan de tir, tant d'un point de vue géométrique que quantitatif. Pour évaluer la qualité de la fragmentation dans la carrière d'Héliopolis, nous avons analysé les données de trois plans de tir à l'aide du modèle Kuz-Ram afin d'étudier la granulométrie du tas abattu. Ce traitement nous a permis d'identifier précisément les paramètres ayant une influence directe sur la distribution granulométrique.

Sur la base de ces résultats, nous avons proposé un autre modèle basé sur la méthode de Langefors et traité par le même modèle. Il apparaît que la qualité obtenue après les tirs effectués dans la carrière n'est pas satisfaisante ; le suivi et l'évaluation des opérations d'abattage ont révélé de nombreuses lacunes. Ces imperfections, directement liées aux paramètres du plan de tir et aux caractéristiques du massif dans lequel l'abattage est effectué, ont conduit à formuler des recommandations pour la carrière de granulats d'Héliopolis afin de les réduire. Parmi ces recommandations, on retrouve notamment:

Il est nécessaire de contrôler la qualité de la fragmentation à chaque étape de l'extraction, en respectant les paramètres du plan d'abattage sous plusieurs aspects. D'un point de vue géométrique, cela concerne principalement la forme et les dimensions de la maille ; ainsi, lors du tir sur plusieurs rangées, il est recommandé d'utiliser une maille décalée. D'un point de vue quantitatif, il s'agit de réduire les charges explosives. Enfin, sur le plan qualitatif, il est essentiel de choisir un type d'amorçage ponctuel associé à une séquence d'initiation optimisée afin d'augmenter les surfaces libres, ce qui contribue à minimiser la fissuration du massif.

Références

- [1] Alipour, A., & Asadizadeh, M. (2023). Rock fragment size prediction using RSM in bench blasting: a focus on the influencing factors and their interactions. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(1), 61. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11072-8>.
- [2] Adesida, P. A. (2022). Powder factor prediction in blasting operation using rock geo-mechanical properties and geometric parameters. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(1), 25-32. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2021.310930.594870>.
- [3] Jiang, X., Xue, Y., Kong, F., Gong, H., Fu, Y., & Zhang, W. (2023). Dynamic responses and damage mechanism of rock with discontinuity subjected to confining stresses and blasting loads. *International Journal of Impact Engineering*, 172, 104404. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104404>.
- [4] Jayasinghe, L. B., Shang, J., Zhao, Z., & Goh, A. T. C. (2019). Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stresses and discontinuity persistence. *Computers and Geotechnics*, 116, 103207. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103207>.
- [5] Xue, Y., Jiang, X., Kong, F., Li, Z., Gong, H., Yang, F., & Chen, H. (2022). Rupture of rock with discontinuities under blasting disturbance: Insights from discrete element method modeling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 116, 102486. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102486>.
- [6] Yari, M., Ghadyani, D., & Jamali, S. (2022). Development of a 3D numerical model for simulating a blast wave propagation system considering the position of the blasting hole and in-situ discontinuities. *Rudarsko-geološko-naftnizbornik*, 38(2), 68-78. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.2.6>.
- [7] Verma, H. K., Samadhiya, N. K., Singh, M., Goel, R. K., & Singh, P. K. (2018). Blast induced rock mass damage around tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.019>.
- [8] Gao, F., Tang, L., Yang, C., Yang, P., Xiong, X., & Wang, W.(2023). Blasting-induced rock damage control in a soft broken roadway excavation using an air deck at the blasthole bottom. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(3), 97. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03087-6>.
- [9] Dhekne, P. Y., Balakrishnan, V., & Jade, R. K. (2020). Effect of type of explosive and blast hole diameter on boulder count in limestone quarry blasting. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4091-4097. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01280-y>.
- [10] Ylitalo, R. M., Zhang, Z. X., & Bergström, P. (2021). Effect of detonator position on rock fragmentation: Full-scale field tests at Kevitsa open pit mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104918. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104918>.
- [11] Saadatmand Hashemi, A., & Katsabanis, P. (2020). The effect of stress wave interaction and delay timing on blast-induced rock damage and fragmentation. *Rock mechanics and rock engineering*, 53, 2327-2346. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02043-9>.
- [12] Hosseini, M., Khandelwal, M., Lotfi, R., & Eslahi, M. (2023). Sensitivity analysis on blast design parameters to improve bench blasting outcomes using the Taguchi method. *Geomechanics and*

- Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 9(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00540-4>.
- [13] Singh, S. P., & Narendrula, R. (2009). Causes, implications and control of oversize during blasting. In Proceedings of the 9th international symposium on rock fragmentation by blasting (pp. 311-317).
- [14] Singh, S. P., Narendrula, R., & Duffy, D. (2005). Influence of blasted muck on the productivity of the loading equipment. In Proceedings of the 3rd EFEE Conference on Explosives and Blasting (pp. 347-353).
- [15] Spathis, A. T. (2009, September). Formulae and techniques for assessing features of blast-induced fragmentation distributions. In Proceedings of 9th international symposium on rock fragmentation by blasting (Fragblast 9), Granada, Spain (pp. 13-17).
- [16] Kanchibotla, S. S. (2003). Optimum blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per broken rock?. *Fragblast*, 7(1), 35-48.
- [17] Mancini, R., & Cardu, M. (2001). *Scavi in roccia—Gli esplosivi*, 295 pp. Hevelius Ed.: Benevento.
- [18] Shteinberg, A. S. (2008). *Fast reactions in energetic materials: high-temperature decomposition of rocket propellants and explosives*. Springer Science & Business Media.
- [19] Zhang Z.X., (2005). Increasing ore extraction by changing detonator positions in LKAB Malmberget mine. *Fragblast*, 9, p. 29-46.
- [20] Zhang, Z. X., & Naartijärvi, T. (2006, May). Applying fundamental principles of stress waves to production blasting in LKAB Malmberget mine. In Proceedings of eighth international symposium rock fragmentation by blasting, Santiago, Chile (pp. 369-374).
- [21] Zhang, Z. X. (2008, June). Impact of rock blasting on mining engineering. In Proceedings of 5th international conference and exhibition on mass mining, Luleå, Sweden (pp. 9-11).
- [22] Zhang, Z. X. (2016). *Rock fracture and blasting: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.
- [23] Zhang, Z. X., Kou, S. Q., Jiang, L. G., & Lindqvist, P. A. (2000). Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 745-762.
- [24] Lutum, E., & Johnson, B. V. (1999). Influence of the hole length-to-diameter ratio on film cooling with cylindrical holes.
- [25] Dremin A. N., Shvedov K. K. and Krivchenko A. L., et al. (1971). Parameters of blast waves after detonation of 6ZhV ammonite charges at explosive--rock interface, *Fiz.-Tekh.Probl.Razrab.Polezn.Iskop.* 2: 34-37.
- [26] Bhandari, S., (1997). *Engineering rock blasting operations*. Rotterdam, pp. 375.
- [27] Clavin, P., & Searby, G. (2017). *Combustion waves and fronts in flows*. Physics Today.
- [28] Bhandari, S. (1975). *Studies on rock fragmentation in blasting* (Doctoral dissertation, University of New South Wales).

- [29] Agyei, G., & Ghansah, M. A. (2023). Optimal Design Blast Parameters for an Effective Rock Fragmentation. *Ghana Journal of Technology*, 7(1), 44-52.
- [30] Carter, R. A. (2012). Software solutions for better blasting. *Engineering and Mining Journal*, 213(12), 54.
- [31] Singh, P. K., Roy, M. P., Paswan, R. K., Sarim, M. D., Kumar, S., & Jha, R. R. (2016). Rock fragmentation control in opencast blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), 225-237.
- [32] Hagan TN. (1983). The influence of controllable blast parameters on fragmentation and mining costs. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*; p. 31e2.
- [33] Singh SP, Abdul H. (2012). Investigation of blast design parameters to optimize fragmentation. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*; 2012. p. 181.
- [34] Ash, R. L. (1985). Flexural rupture as a rock breakage mechanism in blasting. *Fragmentation by blasting*, 24-29.
- [35] Vlasov O. E., (1977). *Theoretical Basics of Blasting Impact*. Moscow: VIA.
- [36] Kutuzov B. N. (1980). *Blasting Operations*. Moscow: Nedra.
- [37] Mosinets, V. N., & Gorbacheva, N. P. (1972). A seismological method of determining the parameters of the zones of deformation of rock by blasting. *Soviet mining science*, 8(6), 640-647.
- [38] Lee, J. H. (2008). *The detonation phenomenon*. Cambridge University Press.
- [39] *Mining Reference Handbook*. (2002). Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. p. 448.
- [40] Gabriel Gaiffe. (2018). Caractérisation globale d'explosifs et de substances connexes (polymères, liants et plastifiants) à l'état de traces sur des prélèvements solides reposant sur la spectrométrie de masse à haute-résolution. *Polymères*. Sorbonne Université, Français.NNT : 2018SORUS493.
- [41] Esen S., Onederra I. and Bilgin H.A. (2003). Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. *Int. J. Rock Mechs Min. Scis.* 40: 485-495.
- [42] Zou D. (2017). *Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering*. Springer Singapore. p. 699.
- [43] Iverson S.R., Hustrulid W.A. and Johnson J.C. (2013). A new perimeter control blast design concept for underground metal/nonmetal drifting applications. *Report of Investigations*.9691 : 79.
- [44] Kutuzov B. N. and Andrievskiy A. P. (2002). *New Theory and new Technologies of Rock Destruction by Extended Explosive Charges*. Novosibirsk: Nauka.
- [45] Baron L. I., Demidyuk G. P. and Lidin G. D., et al. (1981). *Mining operations. Dictionary of terms* (3rd edition. Moscow: Nedra.
- [46] Poma, M., Quispe, G., Mamani-Macedo, N., Zapata, G., Raymundo-Ibañez, C., & Dominguez, F. (2020). Drilling-and-blasting mesh design for underground mining using the Holmberg method. In *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications II: Proceedings of the 2nd*

- International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies: Future Applications (IHIET–AI 2020), April 23-25, 2020, Lausanne, Switzerland (pp. 683-689). Springer International Publishing.
- [47] Fan, Y., Chen, J., Leng, Z., Yang, G., Liu, X., & Tian, B. (2024). Punching mechanism of air-deck stemming for drilling blasting and its influence on rock fragmentation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(5), 3917-3935.
- [48] Persson P.A., Holmberg R. and Lee J. (1994). *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press, Inc., p. 540.
- [49] Singh S.P. (2005). Blast Damage Control in Jointed Rock Mass. *Fragblast*, Vol.9, No.3, pp.175-187.
- [50] Scoble M., Lizotte Y. and Paventi M. (1996). Rock Mass Damage from Blasting: Characterization and Impact. In: Franklin J. and Katsabanis P. (Eds.), *Proceedings of the workshop on Measurement of Blast Fragmentation*, A.A. Balkema, pp. 225- 235.
- [51] Worsey P.N., Farmer I.W. and Matheson G.D. (1981). The Mechanics of Presplitting in Discontinuous Rock. *Proceedings 22nd US Rock Mechanics Symp. Univ. of Missouri Rolla, USA*, pp. 205- 210.
- [52] Hustrulid W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Volume 1, A.A. Balkema Pub., p.382.
- [53] Burkle W.C. (1979). Geology and its Effect on Blasting. *Proceedings of the 5th Conference on Explosives and Blasting Techniques, SEE*, pp. 105-120.
- [54] Singh S.P. and Xavier P. (2005). Causes, Impact and Control of Overbreak in Underground Excavations. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 20, pp. 63-71.
- [55] Cunnigham C.V.B. and Goetzsche A.F. (1996). The Specification of Blast Damage Limitations in Tunneling Contracts. *Tunneling and Underground Space Technology*, 5 (3), pp.23- 27.
- [56] Lewandonski T., Mai Luan V.K. and Danell R. (1996). Influence of Discontinuities on Presplitting Effectiveness. *Proceedings 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Montreal, Canada, pp. 217-225.
- [57] Singh S.P. and Narendrula R. (2007). The Influence of Rock Mass Quality in Controlled Blasting. *26th International Conference on Ground Control in Mining*, pp. 314-319.
- [58] Hustrulid W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Volume 1, A.A. Balkema Pub., p.382.
- [59] Seinov N.P. and Chevkin A.F. (1968). Effect of Fissure on the Fragmentation of a Medium by Blasting. *Fiziko Tekhnicheskie Problemy Razrobotki Poleznykh Iskopaemykh*, no.3, pp. 57-64.
- [60] Kuznetsov, V. M. (1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet mining science*, 9, 144-148.
- [61] Onederra, I. A., & Riihioja, K. J. (2006). An alternative approach to determine the uniformity index of Rosin-Rammler based fragmentation models.
- [62] Roy, M. P., Paswan, R. K., Sarim, M. D., Kumar, S. U. R. A. J., Jha, R. R., & Singh, P. K. (2016). Rock fragmentation by blasting--a review. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 64(9).

- [63] Langefors, U., and Kihlstrom, B. (1963). *The Modern technics of rock blasting*. John Wiley, New York, pp. 1-2.
- [64] Kihlstrom, R. E. (1976). Firm Demand for Information about Price and Technology. *Journal of Political Economy*, 84(6), 1335–1341. <http://www.jstor.org/stable/1831284>.
- [65] Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., Carcedo, F. J. A., & de Ramiro, Y. V. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. USA CRS Press, 41, 35947.
- [66] Hustrulid W. A., and Fairhurst C. (1972). "A Theoretical and Experimental Study of the Percussive Drilling of Rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 9, pp. 431-449.
- [67] Coulombe, C. (2007). *Analyse et optimisation des pratiques d'abattage à l'explosif dans une carrière de granulats*. Mines Paris-Centre de Géoscience, pp. 4-5.
- [68] Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In *Proc. first int. symp. on rock fragmentation by blasting* (pp. 439-453).
- [69] Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S. H., & Pourrahimian, Y. (2009). Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967-973.
- [70] Gustafsson, R. (1973). *Swedish blasting technique*. (No Title).
- [71] Lilly, P.A. (1986). An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability, Davidson J. R., *Proc. of Large Open Pit Mine Conf.*, Newman, WA, The Australasian Institute of Min. and Metal, Parkville, pp. 89–92.
- [72] Cunningham, C. V. B. (1987, August). Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model-four years on. In *Proc 2nd Int. Symp on Rock Fragmentation by Blasting* (pp. 475-478).
- [73] Ouchterlony, F., Sanchidria'n, J.A., and Moser, P. (2017). Percentile Fragment Size Predictions for Blasted Rock and the Fragmentation-Energy Fan, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, DOI: 10.1007/s00603-016-1094-x.
- [74] Maerz, N. H., Palangio, T. C., & Franklin, J. A. (2018). WipFrag image based granulometry system. In *Measurement of blast Fragmentation* (pp. 91-99). Routledge.
- [75] Khadri, R., Khedidja, A., Nafaa, B., & Maha, K. (2023). Geophysical and geological contribution to determining the neritic limestone aquifer structure of Hammam Bradaa–El Fedjoudj (Seybouse medium), Northeastern Algeria. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1). <https://doi.org/10.33271/mining17.01.067>.
- [76] Vila.J.M., (1980). *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des couffins d'Algéro-Tunisiens I.II.III* thèse Es- sciences Paris, pp 139-174.
- [77] Baazi, H. (2023). Aquifer Vulnerability Assessment by DRASTIC and SI methods: The case study of Guelma Plain, Northeast Algeria. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(1), 10045-10050. <https://doi.org/10.48084/etasr.5520>.
- [78] Bouaicha, F., Dib, H., Bouteraa, O., Manchar, N., Boufaa, K., Chabour, N., & Demdoun, A. (2019). Geochemical assessment, mixing behavior and environmental impact of thermal waters in the Guelma geothermal system, Algeria. *Acta Geochimica*, 38, 683-702. <https://doi.org/10.1007/s11631-019-00324-2>.

- [79] Aissaoui, M., Maizi, D., Benhamza, M., Azzouz, K., Belaroui, A., & Bengusmia, D. (2023). Identification and mapping of potential recharge in the Middle Seybouse sub-catchment of the Guelma region (North East of Algeria): contribution of remote sensing, multicriteria analysis, ROC-Curve and GIS. *Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater*, 12(1), 25-37. <https://doi.org/10.7343/as-2023-628>.
- [80] Benmarce, K., Hadji, R., Hamed, Y., Zahri, F., Zighmi, K., Hamad, A., ..., & Besser, H. (2023). Hydrogeological and water quality analysis of thermal springs in the Guelma region of North-Eastern Algeria: A study using hydrochemical, statistical, and isotopic approaches. *Journal of African Earth Sciences*, 105011. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105011>.
- [81] Rahma, K., Abdelhamid, K., Djamel, B., & Nafaa, B. (2023). Integrated gravity and resistivity investigations of the deep Hammam Bradaa aquifer, Northeast Algeria: Implications for groundwater exploration. *Journal of African Earth Sciences*, 105013. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105013> Analyse de la distribution granulométrique après le tir réalisé par les plans de tir existants et celui proposé à l'aide du model Kuz-Ram.
- [82] Kimour, M., & Serradj, T. (2015). Characterization of geological rock mass case of the Socar Heliopolis–Guelma, Algeria Aggregate Quarry. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 205-212.
- [83] Mesec, J., Žganec, S., & Kovač, I. (2015). In-hole velocity of detonation (VOD) measurements as a framework for the selection type of explosive. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(4), 675-680.
- [84] Agrawal, H., & Mishra, A. K. (2018). A study on influence of density and viscosity of emulsion explosive on its detonation velocity. *Model Meas Control C*, 78(03), 316-336.
- [85] Keshavarz, M. H., & Klapötke, T. M. (2019). A novel method for prediction of the critical diameter of solid pure and composite high explosives to assess their explosion safety in an industrial setting. *Journal of Energetic Materials*, 37(3), 331-339.
- [86] Roy, P. P. (2005). *Rock blasting: effects and operations*. CRC Press.
- [87] Hawinkel, J. (2022). Engineered controls to mitigate nitrate leaching from explosives in blast holes. *J. Hawinkel. –Текст: непосредственный//Mine Water Solutions*.

Annexe.2

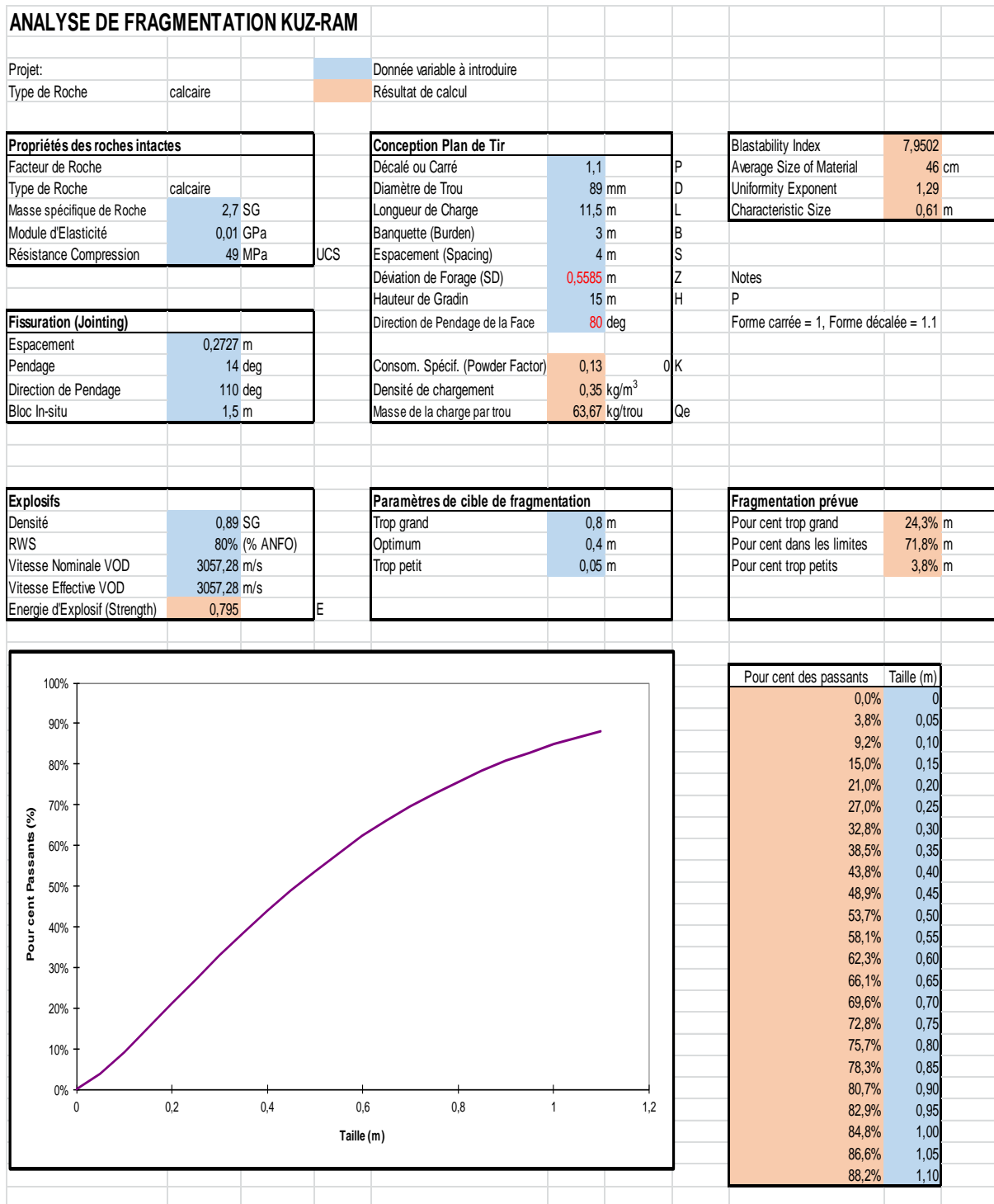


Fig. 2. Analyse granulométrique du deuxième plan de tir.

Annexe.4

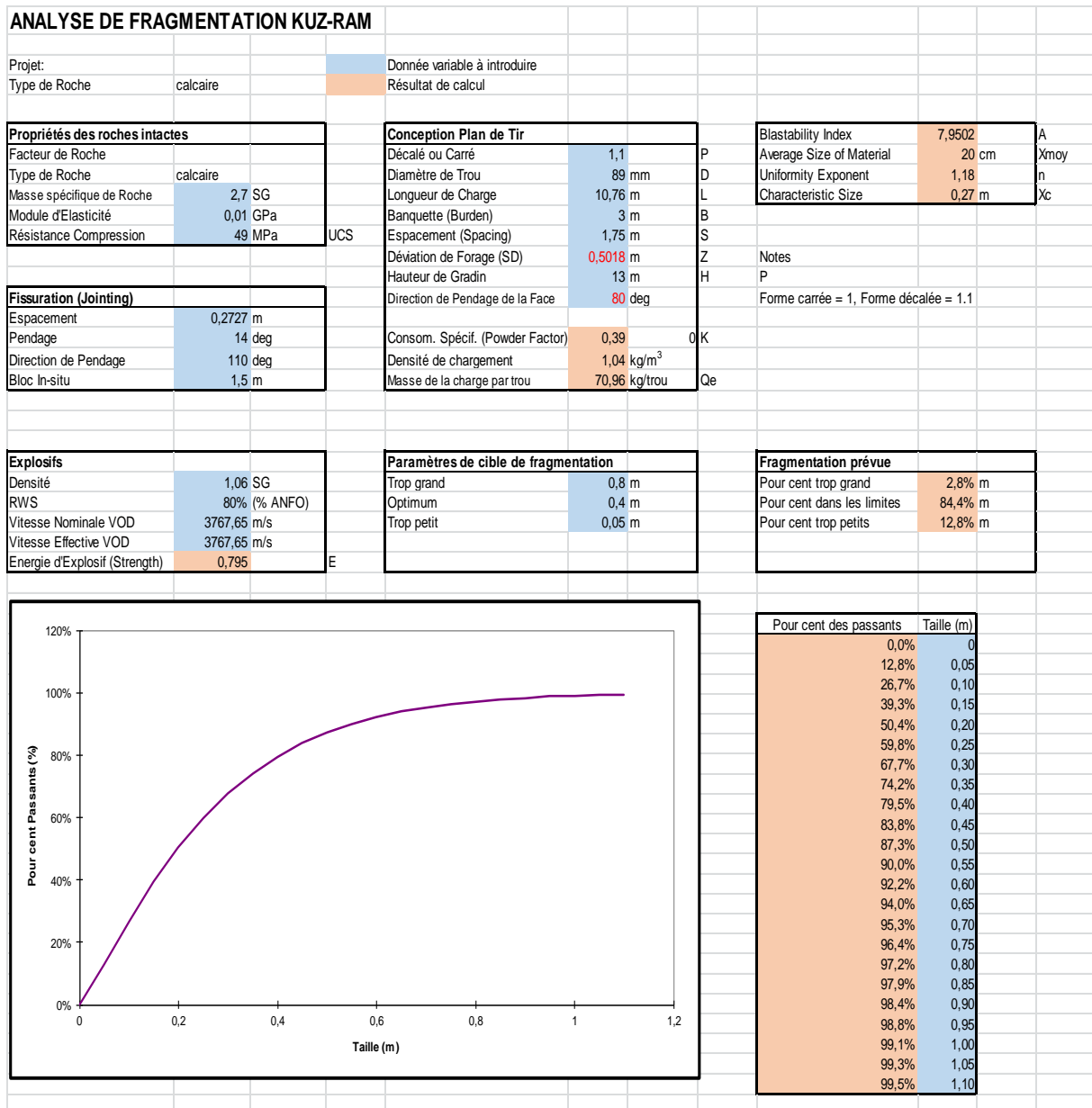


Fig. 4. Analyse granulométrique du deuxième plan de tir (b).

Annexe.6**Tableau. Pourcentage des passants en fonction des dimensions de tas de roches abattues dans le cas d'utilisation d'une maille carrée par le model Kuz-Ram.**

Dimensions, m	Passants % (Maille carrée)						
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	24,30	13,70	8,70	3,90	4,90	4,20	3,70
0,1	48,70	30,60	20,40	9,40	11,40	9,40	8,20
0,15	67,20	46,30	32,20	15,50	18,30	15,00	12,90
0,2	79,90	59,60	43,30	21,70	25,20	20,60	17,50
0,25	88,10	70,30	53,20	27,90	31,90	26,10	22,10
0,3	93,10	78,60	61,90	34,00	38,30	31,40	26,60
0,35	96,10	84,90	69,40	39,80	44,40	36,60	31,00
0,4	97,90	89,50	75,60	45,40	50,10	41,50	35,20
0,45	98,90	92,80	80,70	50,60	55,30	46,10	39,20
0,5	99,40	95,10	84,90	55,40	60,20	50,50	43,10
0,55	99,70	96,70	88,30	60,00	64,60	54,60	46,70
0,6	99,80	97,80	91,00	64,10	68,60	58,40	50,20
0,65	99,90	98,60	93,10	68,00	72,20	62,00	53,50
0,7	100,00	99,10	94,70	71,50	75,50	65,30	56,60
0,75	100,00	99,40	96,00	74,60	78,40	68,40	59,60
0,8	100,00	99,60	97,00	77,50	81,10	71,20	62,30
0,85	100,00	99,80	97,80	80,10	83,40	73,80	64,90
0,9	100,00	99,90	98,30	82,50	85,50	76,20	67,40
0,95	100,00	99,90	98,80	84,50	87,30	78,50	69,70
1	100,00	99,90	99,10	86,40	89,00	80,50	71,80
1,05	100,00	100,00	99,30	88,10	90,40	82,30	73,90
1,1	100,00	100,00	99,50	89,60	91,70	84,00	75,80

Annexe.7**Tableau. Pourcentage des passants en fonction des dimensions de tas de roches abattues dans le cas d'utilisation d'une maille rectangulaire par le model Kuz-Ram.**

Dimensions, m	Passants % (Maille rectangulaire)									
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	17,20	19,40	11,90	9,90	8,20	6,60	6,30	4,90	5,10	3,90
0,1	38,50	39,60	26,00	23,90	18,40	16,20	13,90	11,90	11,30	9,40
0,15	57,10	56,40	39,30	38,20	28,50	26,60	21,70	19,70	17,50	15,50
0,2	71,50	69,30	51,10	51,20	38,00	36,80	29,40	27,60	23,70	21,70
0,25	81,70	78,80	61,10	62,50	46,80	46,40	36,60	35,30	29,70	27,90
0,3	88,70	85,70	69,50	71,70	54,70	55,20	43,40	42,70	35,40	34,00
0,35	93,20	90,40	76,30	79,10	61,60	63,00	49,60	49,60	40,70	39,80
0,4	96,00	93,70	81,70	84,80	67,70	69,70	55,40	56,00	45,80	45,40
0,45	97,70	95,90	86,00	89,10	72,90	75,40	60,60	61,80	50,50	50,60
0,5	98,70	97,40	89,40	92,40	77,50	80,30	65,30	67,00	54,90	55,40
0,55	99,30	98,30	92,00	94,70	81,30	84,30	69,50	71,60	59,00	60,00
0,6	99,60	98,90	94,00	96,40	84,50	87,60	73,30	75,70	62,80	64,10
0,65	99,80	99,30	95,60	97,50	87,30	90,30	76,70	79,40	66,20	68,00
0,7	99,90	99,60	96,70	98,40	89,60	92,40	79,60	82,50	69,40	71,50
0,75	100,00	99,70	97,60	98,90	91,50	94,20	82,30	85,20	72,30	74,60
0,8	100,00	99,80	98,20	99,30	93,10	95,50	84,60	87,60	75,00	77,50
0,85	100,00	99,90	98,70	99,50	94,40	96,60	86,70	89,60	77,40	80,10
0,9	100,00	99,90	99,10	99,70	95,40	97,40	88,50	91,30	79,70	82,50
0,95	100,00	100,00	99,30	99,80	96,30	98,00	90,00	92,80	81,70	84,50
1	100,00	100,00	99,50	99,90	97,00	98,50	91,40	94,00	83,50	86,40
1,05	100,00	100,00	99,70	99,90	97,60	98,90	92,60	95,10	85,20	88,10
1,1	100,00	100,00	99,80	100,0	98,10	99,20	93,60	95,90	86,70	89,60

Annexe.8**Tableau. Pourcentage des passants en fonction des dimensions du tas de roches abattues par les explosions étudiées et par le tir proposé selon le modèle Kuz-Ram.**

Dimensions m	Passants(%)				
	B-1	B-2	B-3a	B-3b	B-4
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,05	13,5	3,8	12,8	14,5	5,7
0,10	28,6	9,2	26,7	33,9	14,5
0,15	42,4	15,0	39,3	51,8	24,3
0,20	54,3	21,0	50,4	66,4	34,2
0,25	64,1	27,0	59,8	77,5	43,7
0,30	72,2	32,8	67,7	85,4	52,5
0,35	78,6	38,5	74,2	90,8	60,3
0,40	83,7	43,8	79,5	94,4	67,3
0,45	87,6	48,9	83,8	96,7	73,3
0,50	90,7	53,7	87,3	98,1	78,4
0,55	93,1	58,1	90,0	98,9	82,7
0,60	94,8	62,3	92,2	99,4	86,2
0,65	96,2	66,1	94,0	99,7	89,2
0,70	97,2	69,6	95,3	99,8	91,5
0,75	97,9	72,8	96,4	99,9	93,4
0,80	98,5	75,7	97,2	100,0	94,9
0,85	98,9	78,3	97,9	100,0	96,1
0,90	99,2	80,7	98,4	100,0	97,0
0,95	99,4	82,9	98,8	100,0	97,8
1,00	99,6	84,8	99,1	100,0	98,3
1,05	99,7	86,6	99,3	100,0	98,7
1,10	99,8	88,2	99,5	100,0	99,1