



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Valorisation des Ressources

Minérales/Exploitation des Mines

Présenté par :

Senoune Fazyl

Messaoudi Nabil

Thème

Conception d'un Plan de Tir Assisté par Ordinateur

Soutenu le 30/07/2025 devant le jury composé de:

Président	Mr AYADEN	MCB	U.A.M.B
Promoteur	Mr FERDJ	MCA	U.A.M.B
Examineur	Mr AIT-HABIB	MAA	U.A.M.B

Année Universitaire : 2024-2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : SENOUANE

Prénom : RAZYL

Matricule : 1919 33005684

Spécialité et/ou Option : Exploitation minière

Département : Mine et Géologie

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Conception d'un plan de tir assisté par
..... ordinateur

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
18/11/2024

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

..... Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : MESSAOUDI
Prénom : NABIL
Matricule : 202033011687
Spécialité et/ou Option : Exploitation minière
Département : Mine et Géologie
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2024./2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Conception d'un plan de travail assisté
..... par ordinateur

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
18./11/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

Ce projet de fin d'études marque l'aboutissement d'un parcours universitaire, mais également le début d'un cheminement professionnel qu'on espère riche et engagé.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont rendu cette expérience possible.

On remercie tout d'abord notre encadrant universitaire, MR Fredj, pour sa bienveillance, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son accompagnement a été essentiel pour nous orienter dans nos réflexions et structurer nos démarches.

Un grand merci aussi à nos camarades, nos enseignants, ainsi que notre famille pour leur soutien moral tout au long de cette période parfois exigeante, mais formatrice. Enfin, nous remercions les membres du jury pour l'intérêt porté à ce travail et pour leurs remarques qui seront précieuses pour la suite de notre parcours.

Dédicaces

Je dédie ce travail à une personne qui a quitté ce monde trop tôt, mon unique idole, mon inspiration, mon seul exemple, celui qui m'a toujours encouragé dans la vie, et qui a tout donné pour que j'arrive à ce que je suis aujourd'hui : **Mon Père**, que Dieu le garde dans son vaste paradis.

À ma vie, mon seul et unique amour, **Ma Mère**, que Dieu te garde pour moi.

À mes chers deux frères **Danny** et **Daryl** que j'aime beaucoup.
À mon oncle, **Tonton Mourad**, qui a été toujours auprès de moi.

À mon encadreur qui m'a aidé à élaborer mon mémoire, **Mr. Fredj**, sans oublier **Mr. Boukarem** et **Mr. Saadoune** qui m'ont aidé par leurs conseils et leurs encouragements pendant mon passage universitaire.

Aux personnes qui m'ont aidé et qui m'ont encouragé : mes aimables amis **Wassim, Gafouda, Houcine, Nabil, Chafik, Remy, Malek, Le Oiseau, Djamel, Hichem et Mazigh**.
Merci.

Fazyl Senoun

Dédicaces

Avant tout, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir guidé, soutenu et accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je la dédie avec tout mon amour à ma mère et à mon père, qui ont toujours cru en moi, m'ont soutenu sans relâche et m'ont transmis les valeurs qui m'accompagnent aujourd'hui.

À mes frères et à ma sœur, pour leur affection, leurs encouragements et leur présence rassurante.

À l'ensemble de ma famille, pour leurs mots de soutien et leur bienveillance.

À mes amis de l'université, avec qui j'ai partagé de précieux moments, des efforts communs et des souvenirs inoubliables.

Et tout particulièrement à Amine, Maria, Salma et Zoubida, pour leur aide et leur présence précieuse tout au long de ce travail.

Nabil Messaoudi

Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Dédicaces	III
Liste des figures	VI
Liste des tables	VII
Table des matières	VII
1 Généralités sur les paramètres d'un plan de tir et les travaux d'abattage	2
1.1 Les paramètres influençant la conception d'un plan de tir	3
1.2 Mécanismes de rupture de la roche	3
1.2.1 Les propriétés géotechniques des roches	4
1.3 Le processus d'abattage	5
1.4 La méthode de Langefors (Suédoise)	5
1.4.1 Banquette maximale $B_{\max}$	6
1.4.2 Sur-profondeur (sous-foration) (U)	7
1.4.3 Profondeur du trou de mine (H)	7
1.4.4 Déviation de forage (E)	8
1.4.5 Banquette pratique (B)	8
1.4.6 Espacement des rangées : a	8
1.4.7 Espacement pratique des trous : S	8
1.4.8 Chargement des trous	9
1.4.9 Longueur de la charge de fond (h_b)	9
1.4.10 Charge linéaire du pied	9
1.4.11 Quantité d'explosif de la charge de fond (Q_b)	9
1.5 Longueur de bourrage (h_0)	9
1.6 Longueur de la charge de colonne (h_c)	10
1.7 Longueur de la charge totale h_t	10
1.8 Longueur du trou h_h	10
1.9 Quantité d'explosif de la charge de colonne Q_c	10
1.10 Charge totale d'explosif par trou de mine Q_{tot}	11
1.11 Charge linéaire de colonne C_{lc}	11
1.12 Volume de roche abattue par un trou V	11
1.13 Détermination du nombre de trou de mine (n)	11
1.14 Taux de forage spécifique : b	11
1.15 Consommation spécifique d'explosif (q)	11
1.16 Volume totale de roches abattues (V_0)	12
1.17 Quantité totale d'explosif utilisé (Q_v)	12

Conclusion	13
2 Description sur l'application	15
2.1 Environnement et Outils de développement	16
2.1.1 L'IDE (VS Code)	16
2.1.2 Le langage Python	16
2.1.3 Les bibliothèques utilisées	16
2.2 Description d'application FNAZOM	17
2.3 Organigramme du programme FN-AZOM	18
Conclusion	20
3 Mise en œuvre sur un cas d'étude	21
3.1 Présentation de l'entreprise (SCHS)	22
3.2 Situation géographique du gisement	22
3.3 Géologie du gisement	23
3.4 Propriétés de calcaire	23
3.5 Plan de tir utilisé à DJEBEL SAFIA	23
3.6 Plan de tir proposé par l'application	24
3.7 Analyse granulométrique	25
3.8 Interface de l'application réalisée FN-AZOM	26
3.9 L'utilité de l'application	29
Conclusion	30
Conclusion Générale	31
Bibliographie	32
Annexes	34
Résumé	37

Liste des figures

1.1	Formation de fractures radiales dues à l'onde de détonation.	4
1.2	Paramètres géométriques d'un gradin.	5
1.3	tructure de la charge.	9
2.1	Organigramme du programme FN-AZOM	19
3.1	Image de la carrière de calcaire DJEBEL SAFIA, wilaya de SKIKDA	22
3.2	Interface d'information du projet.	26
3.3	Page d'accueil	26
3.4	Champs de saisie des paramètres	27
3.5	Choix des types d'explosifs	27
3.6	Resultat des calculs de la méthode langefors	28
3.7	Résultat des calculs en format PDF	28
3.8	interface de modèle kuzram	29

Liste des tableaux

1.1	Classification des facteurs influençant la fragmentation	3
1.2	Constante de la roche c en fonction de la résistance à la compression	6
1.3	Détermination de la valeur du facteur de contrainte f_c	6
1.4	Constante de la roche S_c en fonction de la résistance à la compression	7
1.5	Banquette pratique B_c en fonction de la résistance à la compression et du diamètre des trous	7
1.6	Hauteur du gradin K en fonction de la résistance à la compression et du diamètre des trous	7
1.7	Facteur de roche A en fonction de la dureté et de la fissuration	13
1.8	Influence de paramètres de tir sur n , Cunningham (1983).	14
3.1	Paramètres du calcaire	23
3.2	Paramètres géométriques et opérationnels du tir — DJEBEL SAFIA	23
3.3	Résultats — méthode de Langefors	24
3.4	Paramètres granulométriques	25

Introduction générale

L'exploitation des gisements de minéraux utiles à ciel ouvert débute par une phase essentielle : la préparation des roches en vue de leur extraction. Cette étape conditionne directement la productivité des équipements miniers, la sécurité des travailleurs, ainsi que l'efficacité globale des opérations d'exploitation.

Dans la majorité des cas, cette préparation passe par la déconstruction du massif rocheux afin d'obtenir des fragments de dimensions adaptées aux systèmes d'extraction et de transport. Ainsi, les opérations de minage, et en particulier les tirs de mines, occupent une place centrale dans les carrières de roches dures. Elles consistent à extraire la roche par l'emploi d'explosifs introduits dans des trous de forage réalisés à cet effet.

Un abattage mal conçu ou mal exécuté peut compromettre sérieusement l'exploitation. En effet :

- Une fragmentation insuffisante nécessite un **débitage secondaire** des blocs, générant des coûts additionnels et des retards dans les étapes suivantes ;
- Un matériau mal fragmenté est difficile à charger, ce qui augmente les temps de chargement, réduit la productivité, et accélère l'usure des équipements.

Il devient alors indispensable de définir avec précision un plan de tir adapté en optimisant :

- la maille de tir (espacement et disposition des trous, diamètre, profondeur, inclinaison, etc.) ;
- les procédés et séquences d'amorçage.

Toutefois, l'atteinte de ces objectifs repose sur une connaissance approfondie des nombreux paramètres — à la fois constants et variables — qui influencent la qualité de l'abattage. Pour mieux maîtriser cette complexité et améliorer les résultats, plusieurs méthodes et outils d'aide à la conception de tirs ont été développés, alliant expertise technique, modélisation et technologies numériques.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux :

- **Chapitre I** : Généralités sur les paramètres d'un plan de tir et les travaux d'abattage ;
- **Chapitre II** : Description sur l'application ;
- **Chapitre III** : Mise en œuvre sur un cas d'étude.

1

Généralités sur les paramètres d'un plan de tir et les travaux d'abattage

Introduction

L'élaboration des plans de tir est un élément crucial en exploitation minière à ciel ouvert, puisqu'elle détermine la fragmentation des roches, laquelle influence directement la performance du chargement, du transport et du concassage. Le modèle de Langefors, élaboré dans les années 70, figure parmi les instruments empiriques de premier plan employés pour optimiser ces paramètres.

1.1 Les paramètres influençant la conception d'un plan de tir

La réussite d'un tir en milieu minier repose sur des facteurs géotechniques et techniques visant à obtenir une fragmentation optimale de la roche, facilitant ainsi le chargement et le transport. Elle exige une adaptation du type et de la quantité d'explosif, ainsi qu'une planification précise en fonction de la géologie du site. Une bonne connaissance du massif est donc essentielle pour garantir l'efficacité de l'abattage [4].

TABLE 1.1 – Classification des facteurs influençant la fragmentation

Facteurs contrôlables	Facteurs non contrôlables / difficilement maîtrisables
- Diamètre du trou - Profondeur de foration - Type d'explosif - Inclinaison du trou - Longueur et type de bourrage - Maillage de tir (espacement et banquette) - Orientation du tir - Nombre de faces libres - Volume de la volée - Mode de chargement et d'amorçage - Séquence d'initiation	- Nature géologique du massif - Résistance des matériaux - Discontinuités naturelles (failles, fractures, joints) - Conditions hydrogéologiques (présence d'eau) - Conditions climatiques (saison, température) - Hétérogénéité des propriétés mécaniques

1.2 Mécanismes de rupture de la roche

Lorsque l'explosif est confiné dans un trou de mine et qu'il est détoné, une onde de détonation est générée et se propage dans la roche environnante. À proximité du forage, cette onde provoque un effet de compression, mais en le dépassant, cette contrainte devient une contrainte de traction. Cette première onde de choc traverse la roche environnante à une vitesse comprise entre 3 000 et 5 000 m/s.

Ce passage de la compression à la traction peut être représenté par la Figure 1.1, dans le cas d'un trou foré dans une masse rocheuse sans face libre. La résistance à la traction de la roche est environ 10 à 100 fois inférieure à sa résistance à la compression. Il est donc plus facile de provoquer sa rupture par un effet de traction.

On peut ainsi dire que la fragmentation de la roche est due à deux phénomènes :

- La réflexion des ondes de compression,
- L'expansion des gaz.

Quand une onde de compression passe d'un milieu à plus grande impédance caractéristique vers un autre à plus faible impédance, une partie de l'onde est transmise comme onde de compression, mais une autre partie est réfléchiée en arrière sous forme d'onde de traction [10].

1.2.1 Les propriétés géotechniques des roches

Les propriétés géotechniques des roches peuvent être déterminées soit par des essais mécaniques normalisés, soit par l'utilisation de formules empiriques. Ces propriétés sont essentielles pour caractériser le comportement du massif rocheux face aux contraintes générées par les tirs de mines. Les principales sont [9] :

- **La résistance à la compression** : elle traduit la capacité de la roche à supporter une charge axiale avant rupture. Elle peut être estimée par la formule :

$$\rho_{\text{comp}} = f \times 100 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

- **La résistance à la traction** : elle exprime la fragilité de la roche face aux efforts de traction, généralement bien plus faible que la compression. Elle est donnée par :

$$\rho_{\text{tra}} = (0.08 \div 0.12) \times \rho_{\text{comp}} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

- **La résistance au cisaillement** : elle représente la résistance de la roche face au glissement le long de plans de faiblesse. Elle est approchée par :

$$\rho_{\text{dép}} = (0.20 \div 0.33) \times \rho_{\text{tra}} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

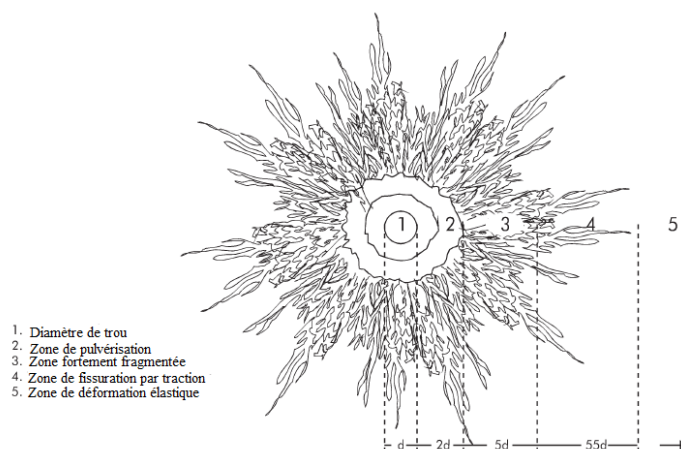


FIGURE 1.1 – Formation de fractures radiales dues à l'onde de détonation.

1.3 Le processus d'abattage

Le procédé d'abattage des roches figure parmi les étapes majeures de la chaîne technologique dans le secteur minier. Cela implique la fragmentation des roches au sein du massif et leur collecte sous forme de morceaux de tailles et de volumes variés. Dans l'exploitation minière, plusieurs techniques d'abattage sont employées, notamment : l'abattage mécanisé, l'abattage hydromécanique, l'abattage par explosifs, et bien d'autres encore... La technique de détonation ne permet jamais d'atteindre un taux de blocs hors normes de 0%, indépendamment du paramètre de qualité de fragmentation des roches, en raison de la fissuration du massif et de la forte dissipation énergétique du tir dans l'atmosphère.

1.4 La méthode de Langefors (Suédoise)

La méthode de Langefors repose sur des études empiriques menées dans des carrières suédoises. Il établit les relations entre la géométrie du plan de tir et l'efficacité de la fragmentation. Cette méthode repose sur des formules empiriques qui permettent d'évaluer, en fonction du diamètre du trou, de l'espacement et de la banquette, la charge explosive optimale à employer pour obtenir une fragmentation efficace. L'objectif est ainsi d'équilibrer la répartition de l'énergie explosive avec les caractéristiques mécaniques de la roche. Dans ses calculs, la méthode de Langefors utilise également des rapports géométriques standardisés (notamment 1 : 1, 2 : 1 et 3 : 1) pour dimensionner la maille de tir, la banquette et la ligne de moindre résistance en fonction des caractéristiques du massif rocheux [9] (voir la figure 1.2)

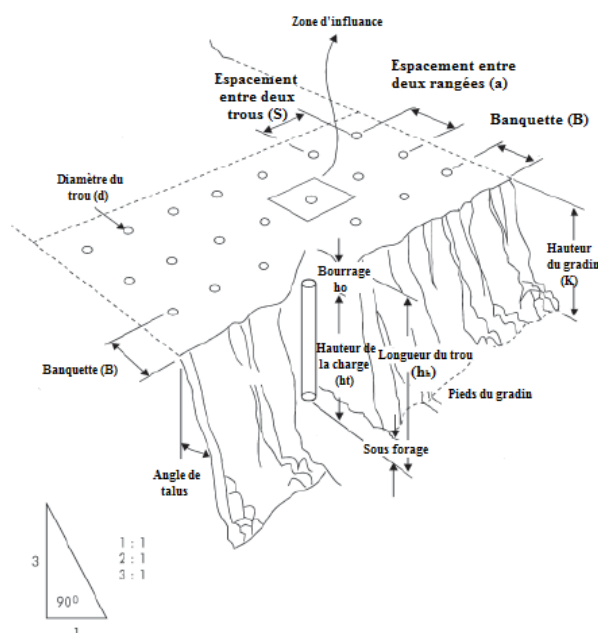


FIGURE 1.2 – Paramètres géométriques d'un gradin.

1.4.1 Banquette maximale $B_{\max}$

$$B_{\max} = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{P \cdot s}{\bar{c} \cdot f_c \cdot \frac{S_c}{B_c}}} ; \text{ (m)}$$

d : diamètre du trou (m)

P : masse volumique d'explosifs (kg/L)

s : puissance de la charge du fond de l'explosif (weight strength)

$\bar{c}$: constante de la roche (kg/m³)

où :

$$\bar{c} = c + 0,005$$

On prend la valeur de c à partir de tableau suivant [6] :

TABLE 1.2 – Constante de la roche c en fonction de la résistance à la compression

	Résistance à la compression (MPa)			
Paramètre	Roche friable < 70	Dureté moyenne 70–120	Roche dure 120–180	Très dure > 180
Valeur de c	0.25	0.35	0.45	0.60

f_c : Facteur de contrainte

TABLE 1.3 – Détermination de la valeur du facteur de contrainte f_c

Rapport (V :H)	Angle avec la verticale	Facteur de contrainte f_c
1 :0	0°	1.00
3 :1	18.4°	0.95
2 :1	26.6°	0.93
1 :1	45°	0.90

S_c/B_c : Rapport de maille

où :

S_c : Espacement pratique en fonction de la résistance à la compression et de diamètre des trous; (m)

TABLE 1.4 – Constante de la roche S_c en fonction de la résistance à la compression

	Résistance à la compression (MPa)			
Paramètre	Roche friable < 70	Dureté moyenne 70–120	Roche dure 120–180	Très dure > 180
S_c	$51 \times d$	$47 \times d$	$43 \times d$	$38 \times d$

B_c : Banquette pratique en fonction de la résistance à la compression diamètre des trous ;
(m)

TABLE 1.5 – Banquette pratique B_c en fonction de la résistance à la compression et du diamètre des trous

	Résistance à la compression (MPa)			
Paramètre	Roche friable < 70	Dureté moyenne 70–120	Roche dure 120–180	Très dure > 180
B_c	$39 \times d$	$37 \times d$	$35 \times d$	$33 \times d$

1.4.2 Sur-profondeur (sous-foration) (U)

$$U = (0,2 \text{ à } 0,35) \cdot B_{max} ; (\mathbf{m})$$

- Le sous forage est nécessaire pour éviter les sur-hauteurs rocheuses au-dessus du niveau théorique.

1.4.3 Profondeur du trou de mine (H)

On calcul la profondeur du trou de mine par la loi suivante [6] :

$$H = (K + U) ; (\mathbf{m})$$

- K : hauteur de gradin est déterminée en fonction de la résistance à la compression selon le tableau suivant On prend la valeur de c à partir de tableau suivant [6] :

TABLE 1.6 – Hauteur du gradin K en fonction de la résistance à la compression et du diamètre des trous

	Résistance à la compression (MPa)		
Paramètre	Roche friable < 70	Dureté moyenne 70–120	Très dure > 180
Hauteur du gradin (K)	$52 \times d$	$44 \times d$	$37 \times d$

- Les trous inclinés présentent un angle de rupture favorable entre les trous et le fond prévu, ce qui réduit la contrainte dans la partie inférieure des trous.

1.4.4 Déviation de forage (E)

$$E = \frac{d}{1000} + 0.03 \cdot H ; (m)$$

- Il faut tenir compte du fait qu'il est impossible de forer un trou exactement conformément aux calculs théoriques. La précision du forage dépend à la fois des machines utilisées et de la compétence de l'opérateur. L'erreur de forage ne doit pas dépasser E, telle qu'elle est calculée selon la formule mentionnée ci-dessus [6].

1.4.5 Banquette pratique (B)

$$B = B_{max} - E \quad (m)$$

Lors du calcul de la banquette pratique, l'erreur de forage doit être déduite. Une règle empirique simple peut être utilisée pour vérifier les calculs :

$$B = d \times 0.0254$$

où :

B : banquette pratique exprimée en mètres (m)

d : diamètre du trou en pouces (inch)

où 1 pouce = 0,0254 m

La banquette pratique est la distance entre le trou de mine et le front le plus proche au moment de l'explosion. Dans les tirs à plusieurs rangées de nouveaux fronts sont créés à chaque détonation successive.

1.4.6 Espacement des rangées : a

$$a = B ; (m)$$

- L'espacement a est la distance horizontale séparant deux trous de mine adjacents dans une même rangée [6].

1.4.7 Espacement pratique des trous : S

$$S = 1,25 \times B ; (m)$$

- L'espacement est la distance entre deux trous de mine adjacents dans une même rangée [6].

1.4.8 Chargement des trous

Pour déterminer les paramètres du chargement, les calculs suivants sont nécessaires, comme l'illustre la figure 1.3 qui suit.

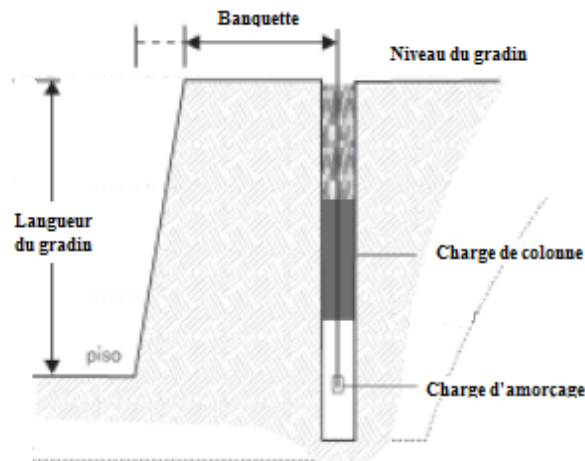


FIGURE 1.3 – tructure de la charge.

1.4.9 Longueur de la charge de fond (h_b)

$$h_b = 1.3.B_{max}; (m)$$

1.4.10 Charge linéaire du pied

Elle est donnée par la relation empirique suivante [6] :

$$l_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P_p ; (kg/m)$$

P_p : Densité d'explosif de pied (Kg/m³)

1.4.11 Quantité d'explosif de la charge de fond (Q_b)

$$Q_b = l_b.h_b; (kg)$$

1.5 Longueur de bourrage (h_0)

La partie non chargée du trou appelée bourrage est normalement égale à la banquette pratique B [6] :

$$h_o = B$$

Le bourrage doit être constitué de sable et de gravier, avec une granulométrie comprise entre 4 à 9 mm.

Des recherches on montré que cette taille offre la meilleure rétention des gaz de détonation. Les fines de forage (poussière de foration) doivent être évitées.

➤ **Si $h_o < B$:**

- Le risque de projection (flyrock) depuis la surface augmente.
- Mais le nombre de blocs diminue.

➤ **Si $h_o > B$:**

- On obtient plus de blocs grossiers.
- Mais les projections superficielles sont réduites ou éliminées.
 - Pour une bonne fragmentation au-dessus de la charge de fond, une charge en colonne est utilisée. Comme cette zone du trou est moins confinée, la concentration de charge peut être réduite :

$$l_c = 40 \text{ à } 60\% \text{ de } l_b$$

1.6 Longueur de la charge de colonne (h_c)

La longueur de la charge en colonne correspond à la partie restante du trou. Elle est donnée par la formule suivante [6] :

$$h_c = H - (h_b + h_o); (m)$$

1.7 Longueur de la charge totale h_t

La longueur totale de la charge est exprimée par la relation [6] :

$$h_t = h_b + h_c ; (m)$$

1.8 Longueur du trou h_h

La longueur du trou s'exprime comme suit [6] :

$$h_h = h_t + h_o ; (m)$$

1.9 Quantité d'explosif de la charge de colonne Q_c

La quantité d'explosif contenue dans la charge de colonne est donnée par [6] :

$$Q_c = l_c \cdot h_c ; (kg)$$

1.10 Charge totale d'explosif par trou de mine Q_{tot}

La charge totale d'explosif par trou de mine s'exprime par la relation [4] :

$$Q_{\text{tot}} = Q_b + Q_c ; (\text{kg})$$

1.11 Charge linéaire de colonne C_{lc}

$$C_{lc} = 40\% \text{ à } 60\% \cdot Q_b ; (\text{kg/m})$$

1.12 Volume de roche abattue par un trou V

$$V = S \cdot B \cdot \left(\frac{K}{\cos(\beta)} \right) ; (\text{m}^3)$$

où :

β : l'inclinaison du trou.

1.13 Détermination du nombre de trou de mine (n)

On peut déterminer le nombre de trous à partir de la formule suivante :

$$n = \frac{w}{S} + 1 ; (\text{trous})$$

où : w : est la longueur du bloc a abattre (m)

1.14 Taux de forage spécifique : b

$$b = \frac{n \cdot H}{n \cdot B \cdot S \cdot K} ; (\text{m/m}^3)$$

• Le taux de forage spécifique est la quantité de forage nécessaire pour abattre 1 m^3 de roche. Il peut être exprimé selon une méthode courante utilisée dans les carrières et les mines à ciel ouvert.

1.15 Consommation spécifique d'explosif (q)

• la consommation spécifique peut être calculée de la même manière que le taux de forage spécifique (b) [4].

$$q = \frac{n \cdot Q_{\text{tot}}}{n \cdot B \cdot S \cdot K} ; (\text{kg/m}^3)$$

• Pour les carrières et les mines à ciel ouvert ainsi que dans les coupes routières ou autres zones où le tir est réalisé dans une zone limitée, la consommation spécifique est calculée par rangée.

$$q = \frac{n \cdot Q_{\text{tot}}}{w \cdot B \cdot K} ; (\text{kg/t})$$

Où : w : est la longueur du bloc (m) • La valeur de la consommation spécifique sera plus élevée en raison de l'influence des trous de bordure.

1.16 Volume totale de roches abattues (V_0)

$$V_0 = V \cdot N; (m^3)$$

1.17 Quantité totale d'explosif utilisé (Q_v)

$$Q_v = Q_{\text{tot}} \cdot N, (kg)$$

Modèle de Kuz-Ram

Le modèle Kuz-Ram est le résultat de la fusion des équations de Kuznetsov et de Rosin-Rammler, ainsi que du modèle empirique de fragmentation. Introduit par Cunningham, le modèle de Kuz-Ram a été largement adopté par divers ingénieurs miniers pour anticiper la fragmentation des roches suite aux explosions. De nombreux chercheurs ont tenté d'améliorer ce modèle de Kuz-Ram en vue de perfectionner la prédiction de la fragmentation (Cunningham, 1983 et 1987) [5]. Le modèle a deux facteurs principaux :

- La taille moyenne des fragments (X_{50}) : est donnée par le modèle de Kuznetsov (Kuznetsov 1973).
- L'indice d'uniformité (n) : il est basé sur des paramètres géométriques de foration et de plan de tir.

Équation de Kuznetsov :

$$x_m = A \cdot \left(\frac{V_0}{Q_v} \right)^{0.8} \cdot Q_v^{\frac{1}{6}} \cdot \left(\frac{E_{\text{exp}}}{115} \right)^{-\frac{19}{30}}$$

Où :

A : Le coefficient de la roche, représentant l'influence de sa nature et de sa structure sur la fragmentation après le tir.

Dureté et fissuration	Facteur de roche A
Roches de dureté moyenne	7
Roches dures mais fortement fissurées	10
Roches très dures et faiblement fissurées	13

TABLE 1.7 – Facteur de roche A en fonction de la dureté et de la fissuration

V_0 : Volume des roches abattues (m^3)

Q_v : Poids de la charge (kg)

E_{exp} : Énergie de l'explosif en termes de puissance (RWS) comparé à celle d'ANFO (%)
(EANFO = 100%)

Formule de Rosin-Rammler :

$$R_x = \exp \left[- \left(\frac{x}{x_m} \right)^n \right]$$

Où :

R_x : pourcentage des fragments dont la taille est supérieure à X (c'est le pourcentage des fragments retenus sur le tamis ou le crible d'ouverture X);(cm)

P(x) : pourcentage des fragments dont la taille est inférieure à X (c'est le pourcentage des morceaux passant à travers le tamis ou le crible d'ouverture X);

X : ouverture du tamis ou du crible; (cm)

X_m : taille caractéristique, c'est la taille par laquelle passe 80% à 90% des fragments; (cm)

n : indice d'uniformité.

Formule de Cunningham : Cunningham proposa la formule suivante pour la détermination de l'indice d'uniformité (Cunningham, 1987 [5].

$$n = \left(2.2 - 14 \cdot \frac{B}{d} \right) \cdot \left(1 - \frac{W}{B} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right) \cdot \left(0.1 + \left| \frac{h_b - h_c}{L} \right| \right)^{0.1} \cdot \left(\frac{L}{H_g} \right)} \cdot K$$

B : Banquette (m),

d : Diamètre du trou (mm),

W : Facteur de déviation (de 0,75 à 1,50 en m),

S : Espacement (m),

h_b : Longueur de la charge de pied (m),

h_c : Longueur de la charge de colonne (m),

K : Hauteur du gradin (m),

L : Longueur de la charge totale (m).

Dans la pratique la valeur de **n** varie de (0,8÷2,2) d'après Cunningham. Les valeurs élevées correspondent à une granulométrie uniforme et les valeurs faibles une granulométrie étalée. L'indice d'uniformité **n** détermine la forme de la courbe de fragmentation. Les effets des paramètres de tir sur **n** sont donnés dans le tableau

Paramètres	Effet sur n
Banquette	Diminution
Exactitude de forage	Augmentation
Longueur de la charge / Hauteur du gradin	Augmentation
Espacement / Banquette	Augmentation
Modèle décalé	Augmentation de 10%

TABLE 1.8 – Influence de paramètres de tir sur n , Cunningham (1983).

Conclusion

La démarche logique pour concevoir un schéma de tir peut se faire en quatre étapes que nous rappelons : recensement des données quantifiées de chantier et des équipements ainsi que la formulation des objectifs poursuivis par le tir ; détermination des paramètres de base du tir : géométrie du front, diamètre de foration, nombre de rangées ; établissement des conditions de réussite du tir : banquette, amorçage, séquence d'initiation ; établissement des paramètres secondaires du tir : rapport de maille, surprofondeur, bourrage.

2

Description sur l'application

Introduction

La simulation des plans de tir à l'aide des logiciels permet d'obtenir des résultats fiables et précis, en tenant compte de la complexité du processus d'abattage par les explosifs et de l'hétérogénéité du massif rocheux.

Ce chapitre décrit le développement de l'application intitulée *FNAZOM*, son interface, son fonctionnement, et les raisons pour lesquelles elle peut réellement faciliter le travail sur la conception de plans de tir à l'explosif. L'objectif était simple : rendre accessible tout le processus de calcul, basé sur les méthodes utilisées en mines et carrières, en s'appuyant sur la modélisation des règles de calcul présentées précédemment (chapitre I), comme celles de Langefors et de Kuz-Ram.

2.1 Environnement et Outils de développement

Le logiciel a été réalisé en langage Python 3, sous le développement intégré (IDE), Visual Studio Code (VS Code), nous avons intégré plusieurs bibliothèques open-source qui assurent une prise en main conviviale et une gestion rigoureuse des calculs sur le côté visualisation et interaction [3].

2.1.1 L'IDE (VS Code)

Pour développer notre application, on a choisi d'utiliser Visual Studio Code (VS Code). C'est un outil qu'on a trouvé simple à prendre en main, mais aussi très puissant. Ce qui nous a plu avec VS Code, c'est qu'il propose plein d'extensions utiles pour Python, comme Pylance pour l'auto compilation, ou encore Python Debugger pour tester le programme étape par étape. En plus, VS Code permet également de visualiser directement les interfaces tkinter et d'organiser efficacement les fichiers du projet [3].

2.1.2 Le langage Python

Le programme a été développé en **langage Python 3**, reconnu pour sa simplicité, sa lisibilité et sa large adoption dans les domaines de **la science des données**, de **l'automatisation**, et de **la visualisation**. Python nous a permis de gérer des interfaces graphiques, de réaliser des calculs techniques complexes et de générer des graphes ou rapports [3].

2.1.3 Les bibliothèques utilisées

➤ tkinter

tkinter est la bibliothèque graphique standard pour Python. Elle agit comme une interface Python pour le toolkit graphique Tk, développé initialement pour le langage Tcl. tkinter permet la création rapide et intuitive d'interfaces graphiques utilisateur (GUI), avec des éléments tels que fenêtres, boutons, champs de saisie, menus, et canevas graphiques, facilitant ainsi le développement d'applications interactives sur différentes plateformes (Windows, etc).

Cette bibliothèque est intégrée directement à Python, ne nécessitant donc aucune installation supplémentaire [6].

➤ **math**

La bibliothèque `math` est une bibliothèque standard intégrée à Python, offrant un large éventail de fonctions mathématiques élémentaires et avancées. Elle inclut notamment des fonctions arithmétiques (racines carrées, puissances), logarithmiques (`log`, `log10`), exponentielles (`exp`), trigonométriques (`sin`, `cos`, `tan`), hyperboliques, ainsi que diverses constantes mathématiques fondamentales telles que π (pi) et le nombre d'Euler e . Cette bibliothèque permet également des arrondissements (`floor`, `ceil`), la détermination des PGCD (`gcd`), et bien d'autres opérations utiles dans divers domaines scientifiques, mathématiques et techniques [2].

➤ **Pyplot**

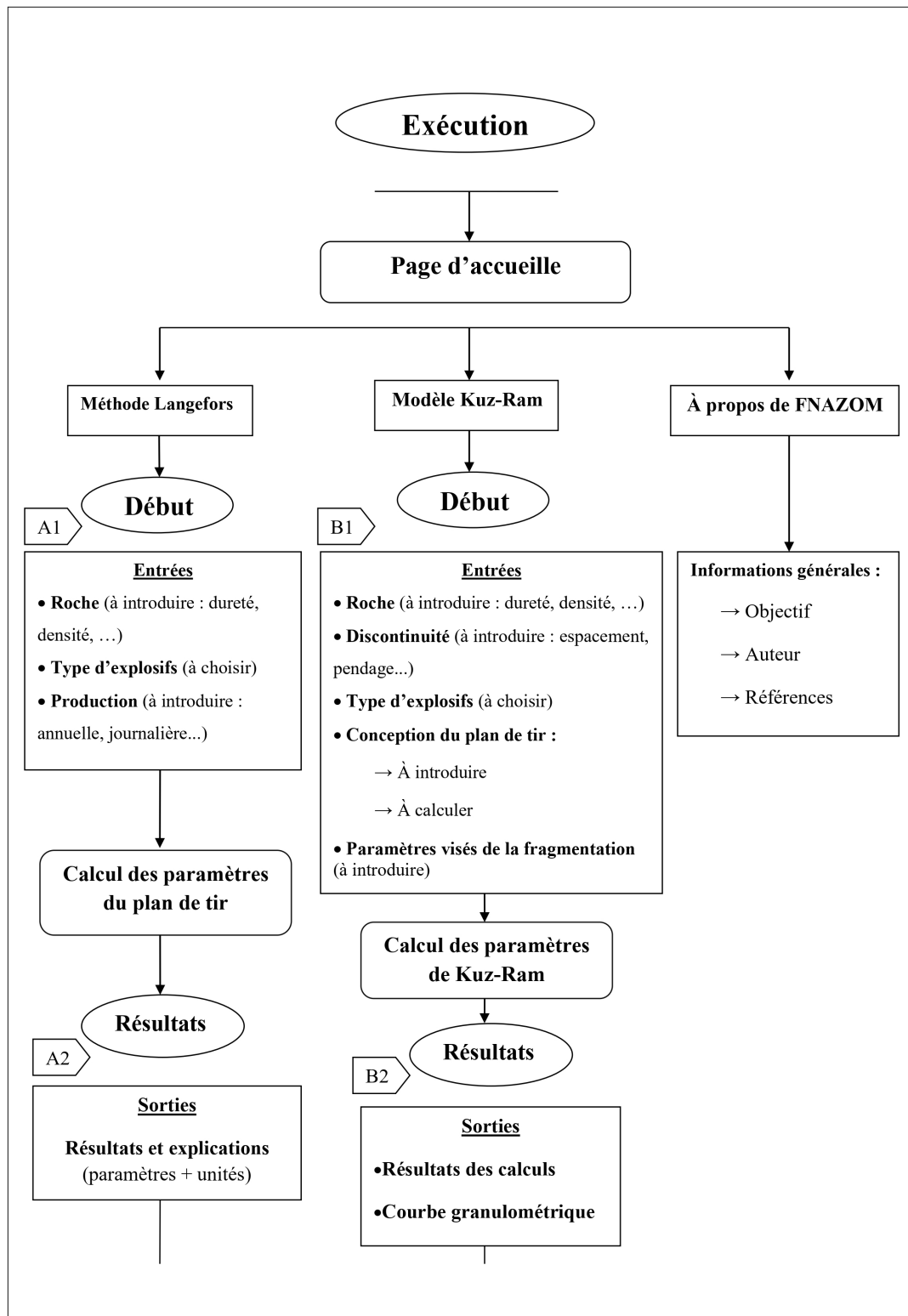
Pyplot est un outil de la bibliothèque Matplotlib en Python qui offre une interface simplifiée pour générer des graphiques et des visualisations de données. Il propose une méthode similaire à MATLAB pour le dessin, avec des fonctions qui prennent en charge l'état de la figure et des axes de façon implicite.

Autrement dit, pyplot offre la possibilité de générer des graphiques en exploitant des fonctions qui opèrent sur une figure déjà existante ou en produisant une nouvelle si besoin, tout en gérant automatiquement les axes et les composants de la visualisation. Ce processus facilite et accélère la création de graphiques, particulièrement pour des opérations habituelles telles que le dessin de lignes, de courbes, d'histogrammes, etc [3].

2.2 Description d'application FNAZOM

Conçue pour répondre aux exigences minières, FNAZOM est une application spécialisée dans l'établissement de plans de tir. Elle intègre le modèle de Langefors pour optimiser les paramètres géométriques, ainsi que le modèle Kuz-Ram pour analyser quantitativement la fragmentation. L'utilisateur a la possibilité de modifier les données de départ pour tester différentes configurations et améliorer les résultats. De plus, l'application offre la fonctionnalité d'exportation d'un rapport final au format PDF, prêt à être intégré dans les documents techniques ou comptes rendus.

2.3 Organigramme du programme FN-AZOM



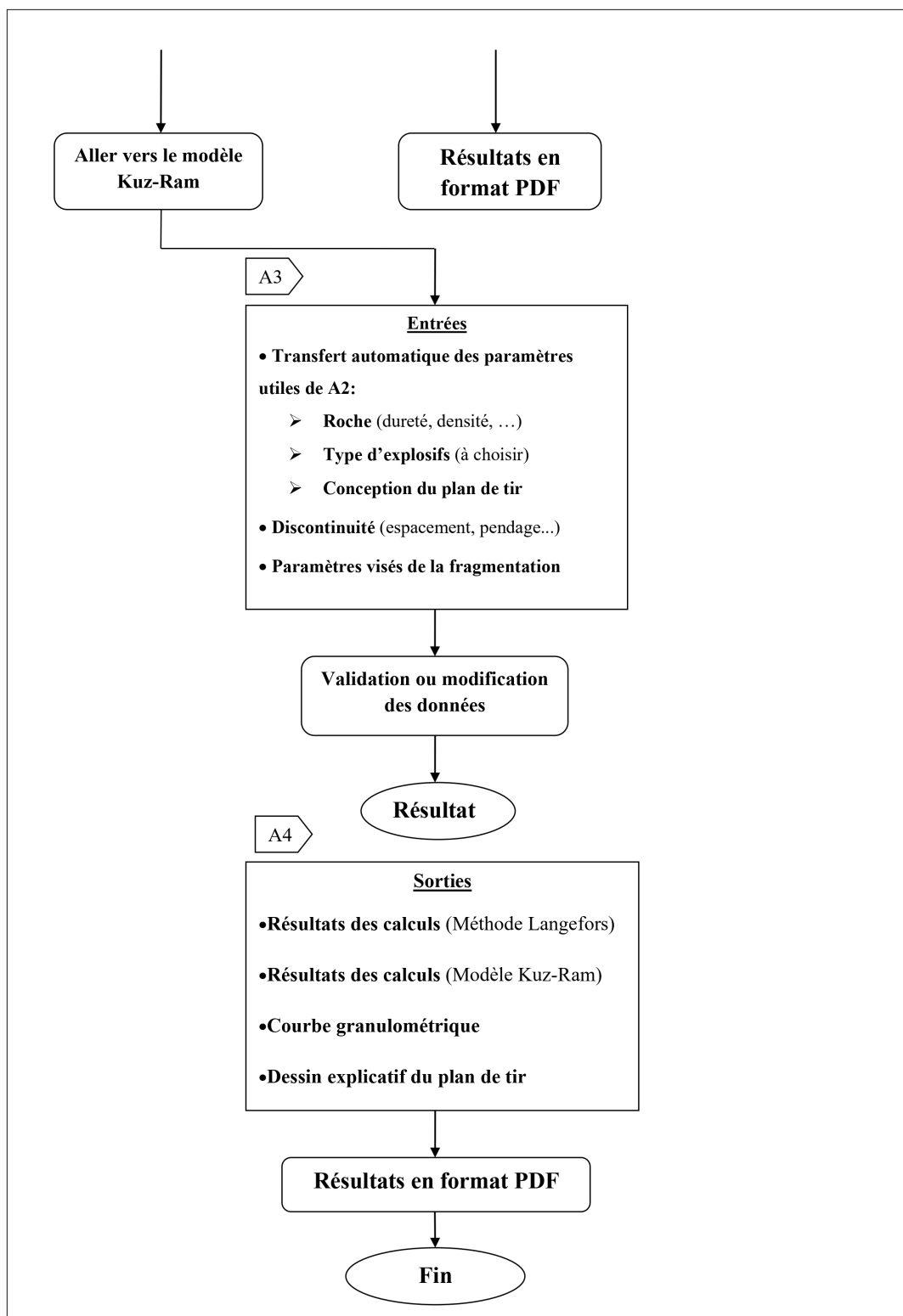


FIGURE 2.1 – Organigramme du programme FN-AZOM

Conclusion

L'application FNAZOM, créée dans le cadre d'une simulation d'exploitation, constitue une approche permettant de reproduire les activités des mines et carrières à travers l'utilisation de modèles mathématiques.

Ces modèles trouvent leur justification tant sur le plan technique qu'économique. En effet, ils permettent de simuler les résultats d'un tir avant sa mise en œuvre réelle, ce qui autorise l'optimisation des paramètres de tir afin d'atteindre les résultats souhaités.

Cela soulève toutefois plusieurs interrogations essentielles : quel est notre niveau de précision ? Quelle est la nature des résultats produits ?

Pour apporter des réponses concrètes à ces questions, il devient indispensable d'envisager un cas d'étude appliqué à une carrière réelle, notamment en Algérie, afin de valider les hypothèses et les performances du système de simulation développé.

3

Mise en œuvre sur un cas d'étude

Introduction

Pour tester la fiabilité de notre application et évaluer la consistance des résultats, on doit passer par un cas d'étude réel des carrières en Algérie, puis comparer les résultats existants à ceux calculés par l'application **FNAZOM**.

3.1 Présentation de l'entreprise (SCHS)

La Société des Ciments de Hadjar-Soud (SCHS) est une entreprise algérienne spécialisée dans la production de ciment, située dans la wilaya de Skikda. Filiale du Groupe GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie), elle a été fondée en 1998 suite à la filialisation de l'ancienne cimenterie d'État. Dotée de deux lignes de production, elle dispose d'une capacité annuelle dépassant 900000 tonnes de ciment. La SCHS est également engagée dans des efforts de modernisation et de respect de l'environnement [7].

3.2 Situation géographique du gisement

Le gisement de DJEBEL SAFIA a été découvert par l'ex-agence nationale du patrimoine minier (ANPM) dans les années 1950 et a commencé à être exploité à grande échelle dans l'année 1969. Le gisement est situé dans la région de Skikda, dans le nord-est de l'Algérie, exactement dans la commune de BECCOUCHE LAKHDHAR, daïra d'AZZABA, Wilaya de SKIKDA.

Il est situé à 8 kms de la cimenterie de DJEBEL SAFIA et se trouve à 59 kms d'ANNABA et à 114 kms de Constantine. La carrière couvre une superficie d'environ 273 hectares. Le gisement est constitué de calcaire et de dolomie de haute qualité, qui est largement utilisés dans la construction et l'industrie sidérurgique.

Au fil des ans, la carrière de DJEBEL SAFIA est devenue l'un des principaux fournisseurs de matériaux de construction en Algérie [8].

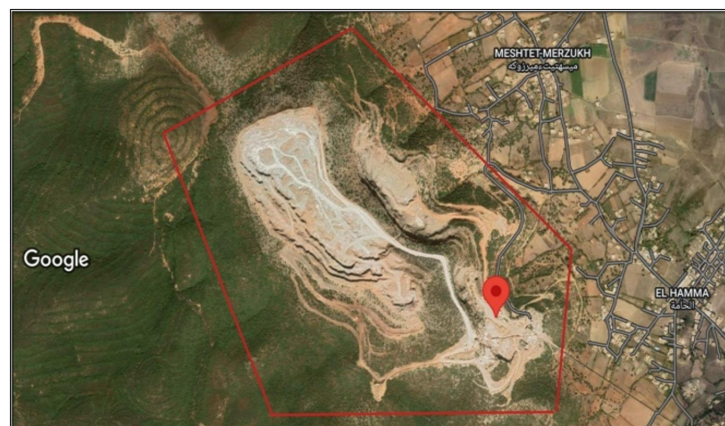


FIGURE 3.1 – Image de la carrière de calcaire DJEBEL SAFIA, wilaya de SKIKDA

3.3 Géologie du gisement

Du bas vers le haut, la composition lithologique du gisement comprend des dolomies compactes du Lias inférieur, des calcaires massifs du Lias moyen, et enfin, des marno-calcaires siliceux qui constituent des silex. Il est par la suite couvert de calcaires marneux et de marnes schisteuses du Crétacé, qui sont suivis d'une formation plus fine constituée de roches fossilifères. Le gisement offre une roche de haute qualité, convenant à l'extraction [7].

3.4 Propriétés de calcaire

TABLE 3.1 – Paramètres du calcaire

Paramètres	Calcaire
Le poids volumique [N/m ³]	2,6
Coefficient de dureté	5
Nombre de jours ouvrables par an	304
Module de Young [GPa]	27
Degré de pendage de discontinuité [°]	48
Direction de discontinuité [°]	135
Espacement entre les discontinuités [m]	1,2

3.5 Plan de tir utilisé à DJEBEL SAFIA

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des paramètres adoptés pour le tir étudié [9].

TABLE 3.2 – Paramètres géométriques et opérationnels du tir — DJEBEL SAFIA

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Diamètre du trou	d	mm	90
Hauteur du gradin	K	m	14
Inclinaison du trou	β	degré	85
Banquette maximale	$B_{\max}$	m	3.2
Sur-profondeur (sous-foration)	U	m	1.6
Déviations de forage (erreur de foration)	E	m	0.2
Banquette pratique	B	m	3.2
Espacement des rangées	α	m	3.2
Espacement pratique des trous	S	m	3.8
Longueur de bourrage	h_0	m	5
Longueur de la charge totale	h_t	m	8.6

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Longueur du trou	h_h	m	13.6
Charge totale d'explosif par trou de mine	Q_{tot}	kg	62
Volume de roche abattue par un trou	V	m ³	204
Nombre de trous de mine	n	trous	56
Consommation spécifique d'explosif	q	kg/m ³	0.48
Volume total de roches abattues	V_0	m ³	11424
Quantité totale d'explosif utilisée	Q_v	kg	3472

3.6 Plan de tir proposé par l'application

TABLE 3.3 – Résultats — méthode de Langefors

Paramètre	Symbole	Unités	Valeur
Diamètre de trou	d	mm	90.00
Banquette maximale	Bmax	m	5.47
Longueur de sous-forage	U	m	2.05
Longueur de trou unitaire	H	m	16.05
Nombre de trous	n	trous	50
Hauteur de gradin	K	m	14.00
Déviations de forage	E	m	0.57
Banquette pratique	B	m	4.90
Espacement des rangées	a	m	5.15
Espacement pratique des trous	S	m	6.12
Taux de forage spécifique	b	m/m ³	0.07
Longueur de la charge du fond	hb	m	7.11
Charge linéaire du pied	lb	kg/m	9.55
Consommation spécifique d'explosif	q	kg/m ³	0.378
Quantité d'explosif du fond	Qb	kg	67.85
Quantité d'explosif de colonne	Qc	kg	19.29
Quantité totale d'explosif utilisé	Qv	kg	101.37
Charge totale d'explosif par trou de mine	Qtot	kg	87.14
Charge linéaire de colonne	Clc	kg/m	33.92
Longueur du bourrage	ho	m	4.90
Longueur de la charge de colonne	hc	m	4.04
Longueur de la charge totale	ht	m	11.15

3.7 Analyse granulométrique

Dans le cadre de cette étude, une analyse granulométrique a été menée afin de mieux comprendre l'efficacité de l'abattage et la qualité de la fragmentation obtenue. Plusieurs paramètres essentiels ont été calculés, notamment ceux relatifs aux caractéristiques de l'explosif, à la charge, ainsi qu'à la répartition des fragments après tir. Ces paramètres permettent d'évaluer de manière quantitative la performance du plan de tir et son adéquation avec les objectifs techniques du chantier.

TABLE 3.4 – Paramètres granulométriques

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Résistance de l'explosif	–	MPa	0,33887755
Consommation spécifique	–	kg/t	0,12
Densité de la charge	ρ	g/m ³	0,32
Quantité d'explosif par trou	Q_e	kg/trou	105,08
Dimension moyenne des morceaux	D_{moy}	cm	82
Indice de blastibilité	BI	–	6,96
Exposant d'uniformité	n	–	1,38
Dimension caractéristique	X_c	mm	1,07
Pourcentage maximal (coarse)	–	%	27,2
Pourcentage moyen (moyenne granulée)	–	%	72,7
Pourcentage minimal (fines)	–	%	0,2

3.8 Interface de l'application réalisée FN-AZOM

La première interface qui s'affiche lors de l'exécution de l'application FNAZOM est présentée dans la figure 3.2, elle porte des informations sur ce projet de fin d'étude.

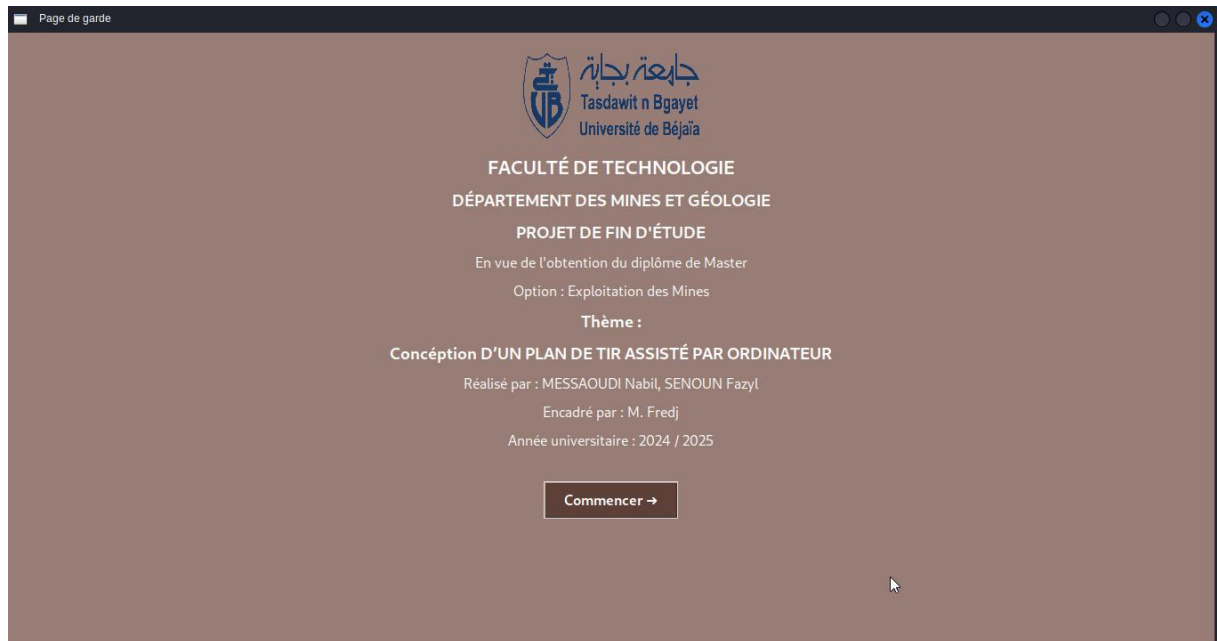


FIGURE 3.2 – Interface d'information du projet.

Pour démarrer la simulation on clique sur le champ **commencer** à milieu en bas de la page, la fenêtre principale l'Accueil 3.3 de FNAZOM s'ouvre, ensuite on peut commencer la conception des tirs.



FIGURE 3.3 – Page d'accueil

Commençant par les caractéristiques de la figure 3.4 : dans la partie droite, on doit remplir les champs de saisie ou choisir à chaque fois dans chaque onglet (la roche, l'explosif...), si le paramètre nécessite un calcul il sera accompagné avec un bouton « calculer » qui nous donne le résultat.

The screenshot shows the 'Logiciel d'Exploitation Minière' application window. On the left is a dark brown sidebar with the title 'Navigation' and three buttons: 'Méthode Longefors' (with a yellow triangle icon), 'Fragmentation' (with a yellow star icon), and 'À propos' (with an 'i' icon). The main area has a light beige background and is titled 'Propriété de la roche'. It contains several input fields and a dropdown menu: 'Dureté :', 'Densité :', 'Profondeur de gisement :', 'Structure du massif :' (with a dropdown menu showing 'Roche friable'), 'Poids voluminique :', 'Diamètre de trou :', 'Inclinaison de trou :' (with a dropdown menu showing '1:0'), 'Hauteur de gradin :', and 'Longueur de bloc :'. To the right of the 'Hauteur de gradin' and 'Longueur de bloc' fields is a brown 'Calculer' button. At the bottom right of the form is a brown 'Suivant →' button.

FIGURE 3.4 – Champs de saisie des paramètres

The screenshot shows the 'Logiciel d'Exploitation Minière' application window. On the left is a dark brown sidebar with the title 'Navigation' and three buttons: 'Méthode Longefors' (with a yellow triangle icon), 'Fragmentation' (with a yellow star icon), and 'À propos' (with an 'i' icon). The main area has a light beige background and is titled 'Explosif'. It contains several input fields and radio buttons: 'Résistance à l'eau :' (with radio buttons for 'Bonne' and 'Médiocre'), 'Type d'explosif :' (with a dropdown menu showing 'GEONIT'), 'Pourcentage :', '2e explosif (optionnel) :' (with a checked checkbox), 'Résistance à l'eau 2e :' (with radio buttons for 'Bonne' and 'Médiocre'), 'Type 2e explosif :' (with a dropdown menu showing 'GEONIT'), and 'Pourcentage 2e explosif :'. At the bottom left of the form is a brown 'Retour' button, and at the bottom right is a brown 'Calculer' button.

FIGURE 3.5 – Choix des types d'explosifs

La figure 3.6 résume toutes les valeurs des paramètres précédemment calculés dans un tableau récapitulant.

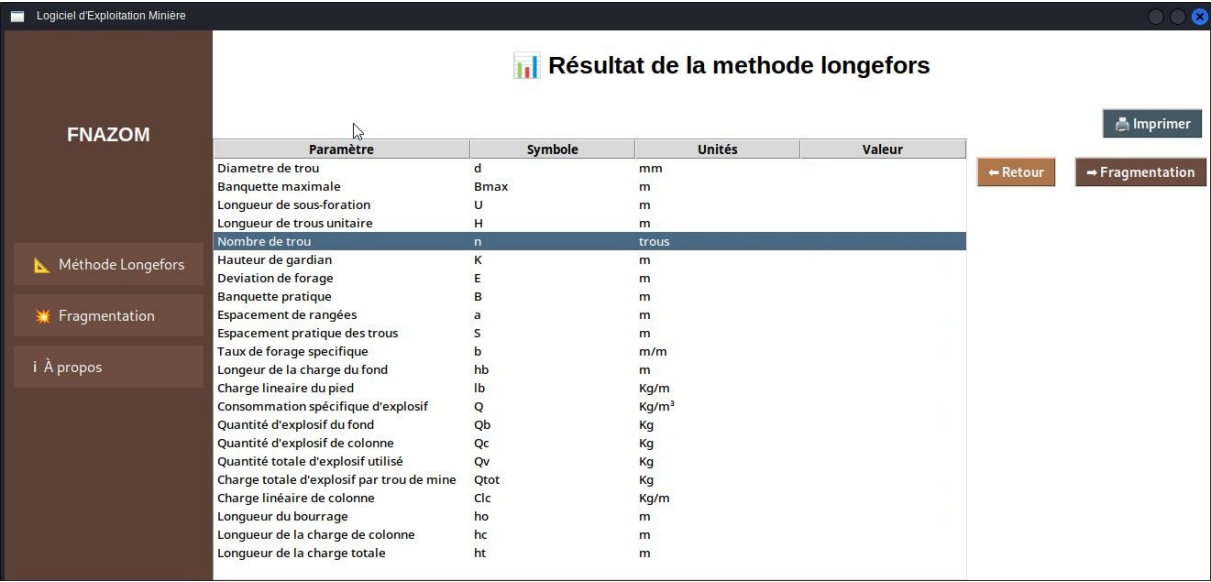


FIGURE 3.6 – Resultat des calculs de la méthode langefors

À la fin, le programme donne un résultat complet sous forme d’un fichier PDF.

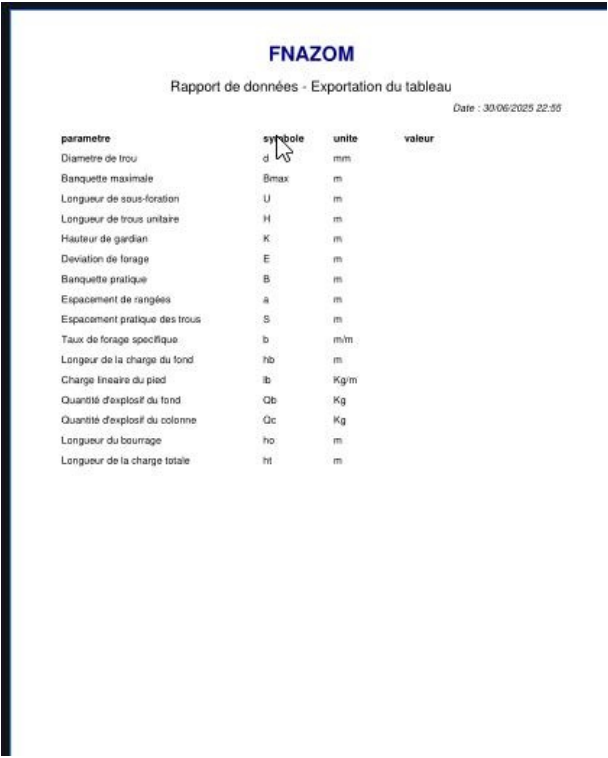


FIGURE 3.7 – Résultat des calculs en format PDF

Pour accéder à la fragmentation ou au modèle de Kuz-Ram, il suffit de cliquer sur le bouton **Fragmentation**

The screenshot shows the 'Interface Fragmentation' window of the 'Logiciel d'Exploitation Minière'. The sidebar on the left contains a 'Navigation' section with three items: 'Méthode Longefors' (highlighted with a yellow icon), 'Fragmentation' (highlighted with a yellow star icon), and 'À propos'. The main content area is divided into four orange panels:

- Propriété de la roche**: Includes input fields for 'Type de roche', 'Masse volumique de la roche (kg/m³)', 'Module de Young (GPa)', and 'UCS (MPa)'.
- Discontinuité**: Includes input fields for 'Espace entre les joints (m)', 'Pendage (°)', 'Direction de pendage', and 'Dimension des blocs (m³)'.
- Paramètres de Forage**: Includes input fields for 'Maille (str)', 'Précision de forage (m)', and 'Angle de talus (°)'. It also features two radio buttons: 'Carrée' (selected) and 'Enquinconce'.
- Fragmentation Target Parameters**: Includes input fields for 'Diamètre maximal (mm)', 'Diamètre moyenne (mm)', and 'Diamètre minimal (mm)'.

A 'Valider' button is located at the bottom right of the main area.

FIGURE 3.8 – interface de modèle kuzram

3.9 L'utilité de l'application

L'application FN-AZOM (version FNAZOM : 1.00) permet de :

- avoir des résultats d'un plan de tir avec la méthode Langefors.
- Indiquer la distribution granulométrique (taux des hors gabarits)
- La conception des plans de tir dans un court temps.
- Elle donne à l'utilisateur la main lors du calcul on modifiant certaines valeurs de certains paramètres selon les objectifs visés et la disponibilité du matériel.
- Permet à l'ingénieur des mines d'estimer correctement la performance d'un tir et les coûts totaux avant que le plan actuel est mis en usage, cette analyse peut bénéficier les
- conceptions du tir initial et les opérateurs qui souhaitent analyser les présentes pratiques de tir.
- Analyser les facteurs influençant le plan de tir et d'avoir la corrélation entre les paramètres et les résultats.

Conclusion

D'après ce qui précède, on a remarqué que :

- **Théoriquement :**

Les résultats issus de l'application, que ce soit par la voie traditionnelle ou celle de Langefors, sont cohérents, pratiques à mettre en œuvre sur le terrain, rentables sur le plan économique et offrent une granulométrie appropriée.

- **Pratiquement :**

La vérification de ces résultats sur le terrain est confiée à l'ingénieur des mines, qui doit réaliser des tests ou des expériences pour en valider la fiabilité.

Conclusion Générale

À travers ce projet de fin d'études, nous avons cherché à appliquer de façon concrète nos connaissances en exploitation minière, en mathématiques et en programmation. L'exploitation des mines à ciel ouvert dépend fortement de la fragmentation des roches. Un plan de tir bien élaboré permet d'optimiser l'emploi des explosifs, de diminuer les dépenses et de maximiser la productivité.

Ainsi, nous avons conçu une application en Python qui s'appuie principalement sur la technique de Langefors pour le calcul des paramètres de forage et de tir. Elle comprend aussi le modèle Kuz-Ram pour l'estimation de la distribution des granulométries suite à l'explosion.

Cette étude met en évidence l'importance des instruments numériques dans la planification des opérations minières. L'emploi de l'informatique facilite l'automatisation des calculs, économise du temps et génère des résultats plus exacts, tout en simplifiant l'analyse et la prise de décisions.

Les résultats obtenus sont logiques, exploitables pratiquement et contribuent à réaliser une fragmentation appropriée. Toutefois, étant donné que les conditions géologiques peuvent fluctuer, il est essentiel que l'ingénieur minier contrôle les résultats par des tests pratiques et les modifie si nécessaire.

Enfin, il est à noter que l'application est encore en phase de développement et pourra être progressivement améliorée afin de mieux répondre aux exigences pratiques de l'exploitation minière.

Bibliographie

- [1] Python Software Foundation. Bibliothèque standard python — tkinter, 2025.
- [2] Python Software Foundation. Bibliothèque standard python — math, 2025.
- [3] Matplotlib Developers. Introduction à pyplot — matplotlib, 2025.
- [4] Stig O. Olofsson. *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Suède, 2^e édition, 2000.
- [5] C.V.B. Cunningham. Fragmentation estimations and the kuz-ram model : four years on. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, 1987.
- [6] Gharbi Kouider. L'adaptation du plan de tir à la blocométrie : un enjeu capital pour un haut rendement minier. Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique, 2007.
- [7] CETIM. Audit environnemental de la carrière calcaire djebel safia n°263 pxc – hadjar soud skikda – schs. Technical Report R31/E/22, CETIM, 2022. Document interne.
- [8] Plan de tir de la carrière calcaire djebel safia, 2025. Document interne, 3 avril 2025.
- [9] Rene Wilfredo Ojeda Mestas. *Diseño de Mallas de Perforación y Voladura*. Pérou, 2010.
- [10] José L. Contreras. *Manual de Perforación y Voladura de Roca*. Number 288. 2011. Professeur de la chaire de Forage et Abattage des Roches.

Annexe A

A.1 Caractéristiques des explosifs (O.N.E.X. Algérie)

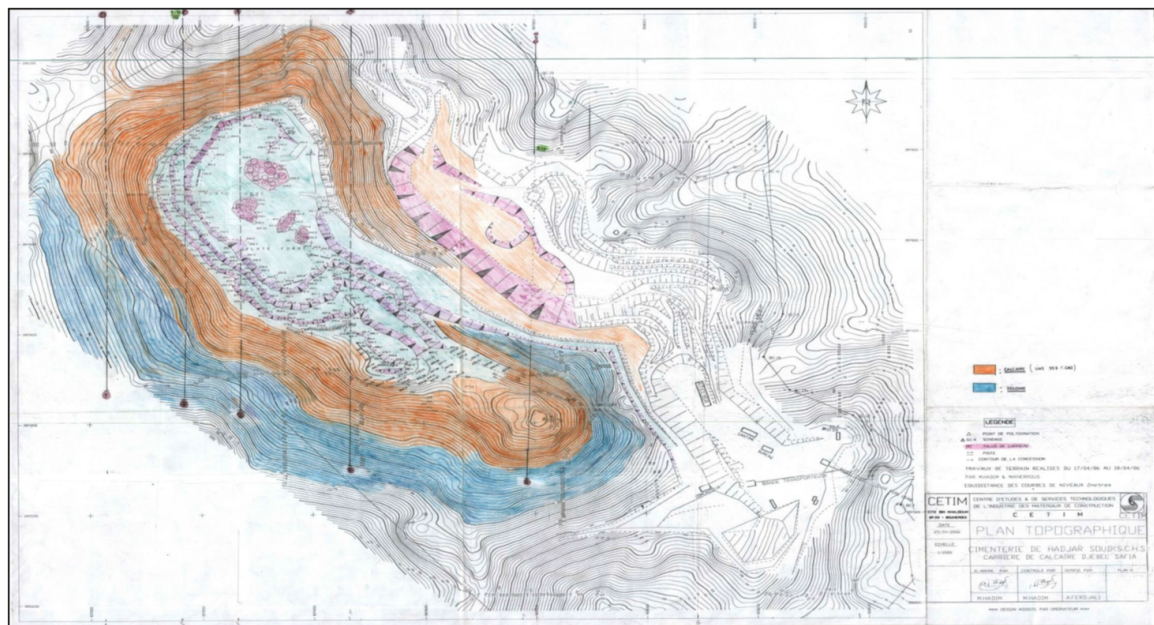
Désignation commerciale	Resistance à l'eau	Densité	Vitesse De Détonation (M/S)	Puissance C, U, P	C, S, E (CM)	Volume gaz L/KG	Utilisation
GEONIT	Très bonne	1,50	5800	1,15	18	733	Explosif sismique en région humide et off-shore. Explosif pour roches dures
GELANIT I	Bonne	1,4	6300	1,33	8	865	Abattage en carrière. Roches dures
GELANIT II	Bonne	1,45	6000	1,27	6	808	Explosif pour roches dures. Abattages souterrains
CARRINIT	Médiocre	1	4500	1,27	10	892	Explosif pour roches dures à mi-dures
MARMANIT I	Médiocre	0,95	4000	1,28	5	842	Explosif pour les roches de dureté moyenne. Abattages souterrains
MARMANIT II	Médiocre	0,98	4100	1,27	2	868	Explosif pour les roches de dureté moyenne.
MARMANIT III	Médiocre	0,95	3800	1,18	2	907	Explosif pour les roches tendres
N. 18 BIS	Médiocre	0,95	2500	1,16	4,5	-	Explosif sismique en région sèche. Explosif pour roches tendres
ANFOMIL	Médiocre	0,90	3000	1,15	0	975	Explosif pour travaux à ciel ouvert, explosifs pour roches

A.2 Conditionnement des explosifs (O.N.E.X. Algérie)

DÉSIGNATION COMMERCIALE	Format Ø × Longueur (mm)	Poids / cartouche (g)	Type de cartouche	Conditionnement
GEONIT	50 × 370	1000	Cartouche plastique (CP)	Caisse de 25 kg
	50 × 420	1250	Gaine plastique (GP)	
	65 × 500	2500	CP	
GELANIT I	25 × 130	100	Papier paraffiné (PP)	Caisse de 25 kg
	30 × 120	125	PP	
	30 × 230	250	PP	
	50 × 420	1250	Gaine plastique (GP)	
	65 × 500	2500	GP	
	80 × 340	2500	GP	
GELANIT II	25 × 130	100	PP	Caisse de 25 kg
	30 × 120	125	PP	
	30 × 230	250	PP	
	50 × 420	1250	GP	
	65 × 500	2500	GP	
	80 × 340	2500	Cartouche plastique (CP)	
CARRINIT	25 × 140	70	PP	Caisse de 25 kg en carton renforcé
	30 × 140	100	PP	
	50 × 640	1250	GP	
	65 × 750	2500	GP	
MARMANIT I	25 × 140	70	PP	Caisse de 25 kg en carton renforcé
	30 × 140	100	PP	
	50 × 640	1250	GP	
	65 × 750	2500	GP	
MARMANIT II	25 × 140	70	PP	Caisse de 25 kg en carton
	30 × 140	100	PP	
	50 × 640	1250	GP	
	65 × 750	2500	GP	
MARMANIT III	25 × 140	70	PP	Caisse de 25 kg en carton renforcé
	30 × 140	100	PP	
	50 × 640	1250	GP	
	65 × 750	2500	GP	
N. 18 BIS	65 × 350	1000	PP	Non précisé

Annexe B

B.1 Plan topographique de la carrière de DJEBEL SAFIA



Résumé

Le présent projet de fin d'études consiste à développer une application informatique nommée FN- AZOM, permettant la conception de plans de tir dans les mines à ciel ouvert. Cette application repose principalement sur la méthode de Langefors pour le calcul des paramètres de tir, ainsi que sur le modèle de Kuz-Ram pour l'estimation de la granulométrie des fragments résultants. Développée en langage Python, cette application vise à simplifier et à accélérer le travail des ingénieurs miniers en automatisant les calculs, en améliorant la précision des résultats, et en générant des plans de tir fiables dans un délai court.

Abstract

This final year project aims to develop a computer application called FN-AZOM, designed for the creation of blasting plans in open-pit mines. The application is based on the Langefors method for calculating blasting parameters and the Kuz-Ram model for predicting fragment size distribution. Developed using the Python programming language, the application facilitates and speeds up the work of mining engineers by automating calculations, enhancing result accuracy, and producing reliable blasting designs in a short time.

Aglam n usenfar

Ahiwen n usenfar-agi n tagara n tfukt d wakud ad d-nzrem asnasel n wahil adrar n yidelsn n wusirem n tanzagt n tfukt, isem-is FN-AZOM. Asnasel-agi yesa ad yettwasqed s tarrayt n Langefors i wuguren n wusirem n tfukt, akked amuddir Kuz-Ram i usteru n telli n yifassen deg wikal. Asnasel-agi yettwassefr s tutlayt n Python, iwata ad yessireg icudden n igganni n wussirem, ad yerr d uzrir, ad isnefli agdud n warraw n tfukt deg waggur gherzen. Awalen yessawal : wusirem n tfukt, tarrayt Langefors, Kuz-Ram, tusna deg uselkim, FN-AZOM, tifrat n yifassen.