



DEDICACES

*A toute la grande famille YOBoue et KOUADIO ainsi
qu'à tous ceux qui ont été là de près comme de loin.*



REMERCIEMENTS

La tenue et le bon déroulement de notre stage ainsi que la rédaction du présent rapport ont été possible grâce à plusieurs personnes à qui nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements.

Nous tenons tout d'abord à remercier toute l'équipe de l'Ecole Supérieure des Mines et Géologie (ESMG), qui depuis trois (03) années nous dispense la formation d'Ingénieur de conception en Mines et de Géologie, tout particulièrement à :

- Professeur YAO Kouakou Alphonse, Directeur de l'ESMG et ses collaborateurs ;
- Madame TRAORE Bintou épouse BAMA, Sous-Directrice des études ;
- Docteur KOUADIO Koffi Eugène, Responsable chargé des stages de l'ESMG ;
- Madame KOUAKOU Reine, Inspectrice de filière ;
- Docteur OKAINGNI Jean-Claude, notre Encadrant pédagogique pour ces observations et ses conseils bénéfiques.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tout le personnel de la compagnie ENDEAVOUR SMI, pour l'opportunité qu'elle nous a offerte de parfaire notre formation et singulièrement à Messieurs et Madame :

- ✚ Faans VORSTER, Directeur Principal du département Mining pour ses observations ;
- ✚ SANOGO Malick, Directeur Technique du département Mining pour ses observations ;
- ✚ BLA Somo Chimène, Ingénieur des Mines Principal du département Mining pour son management ;
- ✚ KOUA Assalet, Senior au service Forage et Dynamitage, notre maître de stage pour l'encadrement. Nous ne cesserons de lui dire merci ;
- ✚ KABLAN Jean-Luc, Ingénieurs Mining au service Forage et Dynamitage pour leur disponibilité tout au long de notre stage ;



✚ CAMARA Mohamed Doudou, Ingénieurs Mining au service Production à la Mine d'or de Lafigué pour son encadrement.

Par ailleurs, que ceux dont les noms ont été omis et qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de notre stage et à la réalisation de ce rapport, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.



AVANT PROPOS

L'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro a été Créé par le décret N° 96-678 du 04 Septembre 1996, et modifié respectivement par les décrets n°2016-747 du 27 septembre 2016 et n°2023-615 du 15 juin 2023, avec pour objectif la formation des élèves Ingénieurs et Techniciens Supérieurs dotés de connaissances théoriques et pratiques. L'INP-HB regroupe aujourd'hui onze (11) écoles à savoir :

- L'École Préparatoire aux Grandes Écoles (EPGE) ;
- L'École Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur (EDP-STI) ;
- L'École Doctorale Polytechnique des Sciences Agronomiques et procédés de Transformation (EDP-SAPT) ;
- L'École Supérieure d'Agronomie (ESA) ;
- L'École Supérieure de Commerce et d'Administration des Entreprises (ESCAE)
- L'École Supérieure d'Industrie (ESI) ;
- L'École Supérieure des Mines et Géologie (ESMG) ;
- L'École Supérieure des Travaux Publics (ESTP) ;
- L'École Supérieure de Chimie, du Pétrole et de l'Energie (ESCPE) ;
- L'École Supérieure de l'Aéronautique et du Spatial (ESAS) ;
- L'École de Formation Spécialisée et de Perfectionnement des Cadres (EFSPC)

En plus de ces grandes écoles l'INP-HB possède plusieurs centres de formation dont :

- Le Centre d'Excellence Africain Mines et Environnement Minier (CEA-MEM)
- Le Centre d'Excellence Africain Valorisation des déchets en Produits à haute valeur ajoutée (CEA-VALOPRO)



- Le Centre de Préparation aux Diplômes de l'Expertise Comptable (CPDEC)
- Le Centre Régional de Formation Supérieure En Métrologie (CREFSEM)
- Le Diplôme d'Etudes Supérieures de Comptabilité et Gestion Financière de l'UEMOA (DESCOGEF)
- Le Master de Data Science-Big Data (DATA SCIENCE)
- Le programme de Formation en Génie des Procédés (FGéPro).
- Le Master en Ressources en Eaux et Risques Environnementaux dans les Métropoles Africaines.
- Le Master Professionnel Transport et Aménagement Urbain (MPTAU)

Conscient de la notoriété qu'elle a sur l'échiquier national et international, l'INP-HB se donne pour mission de former des élites de demain, des personnes hautement qualifiées, capables de contribuer efficacement au développement économique et social non seulement de la Côte d'Ivoire, mais aussi de tout pays qui en manifeste le besoin à partir de la maîtrise de la science, la technique et les nouvelles technologies. C'est dans cette même veine que l'ESMG forme des ingénieurs et techniciens supérieurs dans le domaine des mines et de l'eau. C'est dans ce cadre que nous avons effectué notre stage de fin d'études au sein de la Société des mines d'Ity (SMI) durant la période du 30 Avril 2025 au 29 Octobre 2025. Au cours de ce stage effectué au sein du service Forage et Dynamitage du département Mining de ladite société, le thème qui nous a été soumis s'intitule : « **Amélioration de la gestion des zones d'exclusion lors des tirs de mines : Outils, Méthodes et Suivi opérationnel** ». Ce présent rapport constitue la synthèse des travaux effectués pendant notre stage.



TABLES DES MATIERE

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS	ii
AVANT PROPOS.....	iv
TABLES DES MATIERE.....	vi
LISTES DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ABREVIATIONS	xiii
RESUME.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES	2
I.1. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	3
I.1.1. Historique et création	3
I.1.2. Organisation et activités.....	4
I.2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	10
I.2.1. Cadre géographique	10
I.2.1.1. Localisation	10
I.2.1.2. Climat, végétation et pédologie	11
I.2.1.3. Relief et Hydrographie.....	13
I.2.2. Cadre géologique	14
I.2.2.1. Géologie de la Côte d'Ivoire	14
I.2.2.1.1 Socle du précambrien.....	14
I.2.2.1.2 Le bassin sédimentaire	15



I.2.2.2. Géologie locale	16
I-3 NOTION SUR LE THEME.....	19
I.3.1 Contexte du thème	19
I.3.2 Question d'étude	19
I.3.3 Méthode d'exploitation à la Mine d'Or d'ITY	19
I.3.4 Procédure de tir à la mine d'or d'Ity	20
I.4 NOTIONS SUR LES ZONES D'EXCLUSION	21
I.4.1 Définition	21
I.4.2 Importance de la prédiction des projections de pierres.....	21
I.4.3 Impact des projections de pierres	23
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	25
II.1 MATERIEL	26
II .1.1 Matériel de Sécurité	26
II.1. 2. Matériel Technique	26
II.1.3. Matériel Informatique	27
II .2 METHODES.....	27
II.2.1 Recherche bibliographique	28
II.2.2 Faire une étude de l'existant	28
II.2.2.1 Présentation du dispositif actuel de la zone d'exclusion	28
II.2.2.2 Préparation du tir	28
II.2.2.2.1 Paramètres de forage et dynamitage	29
II. 2.2.3 Représentation des distances d'exclusions	33
II. 2.3 Identification des paramètres influençant la projection des fragments	33
II.2.3.1 Paramètres contrôlables	34
II.2.3.2 Paramètres incontrôlables	35



II.2.4 Détermination du Modèle de prédiction des projections de roches.....	36
II.2.4.1 Modélisation de la projection de pierres.....	36
II.2.4.2 Analyse comparative des approches réaliste et cinématique pour la prévision des projections	37
II.2.4.2.1 Approche réaliste (ou physique)	37
II.2.4.2.2 Approche cinématique	37
II.2.4.3 Vitesse de projection des particules.....	38
II.2.4.4 Equation du mouvement de la particule avec résistance à l'air selon Chernigovskii	39
II.2.4.5 Détermination de l'enfouissement du bourrage.....	41
II.2.4.6 Évaluation des distances de retombée des fragments rocheux	43
II.2.4.6.1 Élaboration des sections des différents niveaux des fosses	43
II.2.4.6.2 Traitement des données	44
II.2.4.6.3 Détermination des zones exclusions	46
CHAPITRE III : RESULTATS, ANALYSES ET INTERPRETATIONS.....	47
III.1. ETUDE DE L'EXISTANT	48
III.1.1 Présentation dispositif actuel.....	48
III.1.2 Paramètres de tir	49
III.1.3 Critique de l'existant.....	49
III.2 INFLUENCE DES PARAMETRES DE TIR SUR LA PROJECTION DES PARTICULES	49
III.2.1 le diamètre du trou.....	49
III.2.2 Le facteur forme	50
III.2.3 La hauteur de bourrage.....	51
III.2.4 La densité de la roche	51
III.2.5 La densité de l'explosif	52



III.3 DETERMINATION DU MODELE DE PREDICTION DES FRAGMENTS.....	53
III.3.1 Vitesse de projection	53
III.3.2 Détermination de l'enfouissement du bourrage	53
III.3.3 Distance maximale de projection	54
III.3.3.1 Présentation du modèle obtenu.....	54
III.3.4 Lecture des distances de projection.....	60
III.3.5 Détermination de la zone d'exclusion	73
III.3.6 Etude comparative des performances des diamètres utilisés.....	76
IV. RECOMMANDATIONS.....	80
CONCLUSION	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82
ANNEXE.....	I



LISTES DES TABLEAUX

Tableau I: Paramètres de tir	49
Tableau II: Variation de la vitesse en fonction du facteur forme	53
Tableau III : Coefficient d'énergie en fonction de la hauteur de bourrage	54
Tableau IV: Paramètres de tir	60
Tableau V: Paramètres Walter-Bakatouo	61
Tableau VI: Portée maximale de projection	72
Tableau VII: Zones exclusion.....	74
Tableau VIII: Zone exclusion adaptée	74
Tableau IX: Vibrations et suppressions aérienne	75

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Historique de la SMI de 1970 à 2022	4
Figure 2: Organigramme de la société des Mines d'Ity	6
Figure 3: Carte de localisation et des voies d'accès de la zone d'étude.	10
Figure 4: Carte de localisation des permis d'Ity (Teki, 2014).	11
Figure 5: Moyenne par mois des précipitations enregistrées à Ity de 1990 à 2014	12
Figure 6: Sous-bassins versants et les principaux cours d'eaux d'Ity (Koné, 2019).....	13
Figure 7: Géologie simplifiée du craton Ouest-Africain (Vic et Billa, 2015.)	16
Figure 8: Méthode d'exploitation Minière par fosses emboîtées (Kamulete, 2014)	20
Figure 9: Mécanisme de projections de pierres (Zhou et al., 2019)	23
Figure 10: Illustration des jets de pierres et Impacts.....	24
Figure 11: Modèle réaliste et le modèle cinématique (McKenzie, 2013 pages 2).....	38
Figure 12: Trajectoire de la particule d'énergie (Cameron McKenzie, 2013 pages 3)	39
Figure 13: Diagramme de confinement de l'énergie	42
Figure 14: Clearance Map	48
Figure 15: Influence du diamètre du trou	50
Figure 16: Influence du facteur forme sur la portée	50
Figure 17: Influence de la hauteur de bourrage sur la portée	51
Figure 18: Influence de la densité de la roche.....	51
Figure 19: Influence de la densité de l'explosif.....	52
Figure 20: Feuille de calcul du modèle	57
Figure 21: Position de la particule	58
Figure 22: Section de la fosse.....	59
Figure 23: Coordonnées des points issus des sections	59
Figure 24: Exemple de résultat de simulation	60
Figure 25: Coordonnées de la section	61
Figure 26: Direction de la section Est-Ouest.....	61
Figure 27: Section de la fosse de direction Est-Ouest	62
Figure 28 : Section Est-Ouest roche transitionnelle au niveau 265 m.....	63
Figure 29: Section Est-Ouest roche saine niveau 265 m	64
Figure 30: Section Est-Ouest Roche saine niveau 115 m	65
Figure 31 : Roche saine Est-Ouest niveau 115 m diamètre 127 mm	66



Figure 32: Coordonnées de la section North-South	66
Figure 33: Section dans direction Nord-Sud.....	66
Figure 34: Section Nord -Sud	67
Figure 35: Section Nord-Sud roche saine niveau 230 m	68
Figure 36: Section North-South roche transitionnelle niveau 230 m	69
Figure 37: Coordonnées de la section	69
Figure 38: Section dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest.....	69
Figure 39:Section North-East/Sud-Ouest.....	70
Figure 40: Section Nord-Est/Sud-Ouest roche saine Niveau 268 m	71
Figure 41 :Section North-East/South-West roche transitionnelle niveau 268 m.....	72
Figure 42: Comparaison des diamètres	76
Figure 43: Carte nouvelle zone exclusion engins	77
Figure 44: Bakatouo en Juin	78
Figure 45: Walter en Juin.....	78
Figure 46: Walter en Juillet.....	79
Figure 47: Bakatouo en Juillet	79
Figure 48: Fosse de Walter et Bakatouo	79



LISTE DES ABREVIATIONS

ANFO: Ammonium Nitrate Fioul Oil

BCM: Bank Cubic Meter

cm : centimètre

CIL: Carbon In Leach (lixiviation en cuve)

Db : Decibel

DT: Dump Trucks

DTM : Digital Terrain Modèle (Modèle digitalisé du terrain)

EPI : Equipement de Protection Individuel

g : gramme

Ga : Milliards d'années

Kg : Kilogramme

mm : millimètre

m : mètre

NE : Nord-Est

Nonel : Non Electrique (Détonateur)

SFTP : Société de Forage et de Travaux Publiques

SMI : Société des Mines d'Ity



RESUME

Les pratiques d'abattage augmentent de plus en plus dans les activités minières pour accroître la production de l'or. Cette pratique d'abattage engendre des nuisances qui peuvent être nocives pour le personnel ainsi que les équipements. A cet effet, des zones d'exclusion de 300m et de 500m ont été établies pour les équipements ainsi que le personnel quel que soit le type de tir, la profondeur ou les paramètres de tirs. Dès lors, nous nous posons la question de savoir comment définir et ajuster les zones d'exclusion lors des tirs de mines en fonction de la profondeur, des paramètres de tir et des propriétés géomécaniques des roches. C'est pourquoi, dans le contexte de l'amélioration de la gestion de cette zone d'exclusion, il nous a été soumis le thème suivant : **Amélioration de la gestion des zones d'exclusion lors des tirs de Mines : Outils, méthodes et suivi opérationnel**. L'objectif général de cette étude est de mettre en place un outil d'aide à la prédiction de la distance maximale de projection des particules lors des tirs à l'explosif. Spécifiquement, il a été question d'abord d'analyser la gestion existante des zones d'exclusion, puis identifier les paramètres influant sur la distance de projection des fragments, et pour finir, modéliser et estimer les distances maximales de projection en fonction des paramètres. La modélisation a été réalisée à travers les équations proposées par **Chernigovskii (1985)** pour calculer les trajectoires de vol sous l'influence de la résistance de l'air, les équations d'estimation de la vitesse de lancement de la particule de **Lundborg (1974)**. Il ressort de cette étude que la zone d'exclusion de 300 m peut être réduite à 250 m dans une roche transitionnelle avec une hauteur de bourrage de 3,3 m, 3 m, et 2,8 m avec un diamètre de **127 mm**, et dans la roche saine pour une hauteur de bourrage de 3 m avec un diamètre de 127mm. Pour arriver à cela, nous avons suggéré pour l'utilisation du modèle de s'assurer que les coordonnées des sections soient parfaitement entrées, interpréter correctement la distance maximale projetée, vérifier les paramètres d'entrées avant toute simulation. Dans la pratique d'abattage, nous suggérons d'utiliser les diamètres de forage de 127 mm pour les tirs, aussi respecter la taille du matériau de bourrage afin d'optimiser le confinement, respecter la densité d'explosif utilisé lors du chargement et surtout éviter les surcharges d'explosifs.

Mots clés : zone d'exclusion, prédiction, trajectoires, gestion, simulation, productivité.



ABSTRACT

Blasting practices are increasingly used in mining operations to boost gold production. However, blasting generates nuisances that can be harmful to both personnel and equipment. For this reason, exclusion zones of 300 m for equipment and 500 m for personnel have been established. This raises an essential question: how can exclusion zones be defined and adjusted during blasting operations as a function of pit depth, blasting parameters, and the geomechanical properties of the rock mass? Within this context of improving exclusion zone management, the following theme was assigned: **Improvement of Exclusion Zone Management During Mine Blasting: Tools, Methods, and Operational Monitoring**. The overall objective of this study is to develop a predictive tool for estimating the maximum flyrock distance during blasting operations. Specifically, the study consisted of analyzing the current management of exclusion zones, identifying the parameters influencing flyrock distance, and finally modeling and estimating maximum projection distances based on these parameters. To model flyrock behavior, empirical formulations were used, including the motion equations proposed by Chernigovskii (1985) to calculate flight trajectories under air-resistance effects, and Lundborg's (1974) equation for estimating particle launch velocity. By combining these equations, simulations were carried out on the Walter pit. The results show that the 300 m exclusion zone can be reduced under certain conditions: in transitional rock with stemming heights of 3.3 m, 3.0 m, and 2.8 m for a 127-mm hole diameter, and in fresh rock with a stemming height of 3.0 m for the same diameter. Under these specific conditions, the exclusion distance may be reduced to 250 m. To reliably apply the model, we recommend ensuring that the section coordinates are correctly entered, interpreting maximum projection distances accurately, and checking all input parameters before any simulation.

In practical blasting operations, the study further recommends using 127-mm drill hole diameters, maintaining appropriate stemming lengths to optimize confinement, avoiding explosive overcharging, and adhering strictly to the required explosive density during loading.

Keywords : Exclusion zone, prediction, trajectories, management, simulation, productivity



INTRODUCTION

Les opérations de tir de mines constituent une étape cruciale dans le cycle de production d'une mine à ciel ouvert. Cependant, ces tirs à l'explosif engendrent des effets indésirables tels que les projections de pierres, les vibrations sismiques et les surpressions aériennes. Parmi ces phénomènes, la projection des pierres représente l'un des risques les plus critiques, car elle peut entraîner des dommages matériels importants, voire des accidents corporels. Les données historiques résumées par **Verakis et Lobb (2003)** montrent que, pour la période de 1978 à 2001, un total de 195 accidents liés aux tirs de mines se sont produits dans les mines de charbon à ciel ouvert aux États-Unis dont 54 accidents (27,69 %) dus à des projections de pierres. Pour pallier ces risques, les sites miniers mettent en place des zones d'exclusion autour des aires de tir, au sein desquelles toute activité est suspendue pendant les opérations de tirs. Ces zones sont généralement définies à partir de distances de sécurité standardisées, souvent fixées à 300 m pour les équipements et infrastructures, et 500 m pour le personnel. Toutefois, ces distances, bien que garantes de la sécurité, peuvent s'avérer excessivement conservatrices et engendrer des pertes de productivité significatives. Il devient essentiel de réévaluer ces distances de sécurité à partir de paramètres réels de terrain (profondeur de la fosse) et des propriétés géomécaniques des roches afin de déterminer des distances maximales de projection adaptées à chaque contexte géologique. C'est dans cette optique qu'à l'issue de notre stage il nous a été proposé le thème suivant : **Amélioration de la gestion des zones d'exclusion lors des tirs de Mines : Outils, méthodes et suivi opérationnel.** Cette situation soulève donc une interrogation majeure pour la sécurité et la performance opérationnelle : Comment définir et ajuster les zones d'exclusion lors des tirs de mines en fonction de la profondeur, des paramètres de tir et des propriétés géomécaniques des roches ? C'est pour répondre à cette question que l'objectif général de cette étude est de mettre en place un outil d'aide à la prédiction de la distance maximale de projection des fragments.

Il s'agira spécifiquement de :

- Faire une étude de l'existant ;
- identifier les paramètres influençant la portée des fragments ;



- modéliser et estimer la distance maximale de projection afin d'actualiser les zones d'exclusion.

Ce mémoire, qui rend compte de l'étude comporte trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités faisant la présentation de la structure d'accueil et de la zone d'étude ainsi qu'aux notions relatives à l'activité de dynamitage. Le matériel de travail ainsi que la méthodologie adoptée sont présentés dans le deuxième chapitre. Le dernier chapitre rend compte des résultats obtenus, de leurs interprétations et des différentes recommandations.



I.1. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

I.1.1. Historique et création

La mine d'or d'Ity détient la plus longue histoire d'exploitation (figure 1) de toutes les mines de côte d'ivoire et a produit plus de 1,2 million d'once d'or en plus de 25 ans de production. Dans les années 1950, près du village d'Ity, le cuivre et l'or ont été découverts pour la première fois près lors de l'exploration par le Bureau Minier de la France d'Outre-Mer (BUMIFOM). Après cela, d'autres investigations ont été effectuées dans les années 1990 aboutissant à la découverte de plusieurs autres gisements.

Les premières tentatives d'extraction de l'or sur le site se sont révélées infructueuses, principalement en raison de la finesse de l'or et de la rhéologie complexe du minerai. En 1983, à la suite de plusieurs études technico-économiques, la Société des Mines d'Ity (SMI) a été créée afin de permettre l'exploitation et la valorisation du gisement. Jusqu'en 2017, l'exploitation reposait sur des méthodes d'extraction à ciel ouvert combinées à un procédé de lixiviation en tas pour la récupération de l'or.

Cependant, dès 2014, une étude de cadrage a été initiée en vue de remplacer l'usine de lixiviation en tas par une usine CIL (Carbon-in-Leach), c'est-à-dire une unité de lixiviation en cuve capable de traiter 1,5 million de tonnes de minerai par an. Les conclusions favorables de cette étude ont conduit le groupe La Mancha propriétaire de la SMI avant son rachat par Endeavour Mining en 2017 à lancer, entre fin 2014 et début 2015, plusieurs programmes de développement visant l'ouverture des fosses de Daapleu, Zia NE, Bakatouo et Mont Ity. Par ailleurs, après la mise à jour des estimations en termes de ressources et réserves. Ces nouvelles ressources, particulièrement attractives avec une estimation d'environ 3,1 millions d'onces d'or, ont conduit à la réalisation d'une étude de faisabilité du projet CIL, portant cette fois sur un taux de traitement de 3 millions de tonnes de matériaux par an. Cette étude a ensuite été suivie d'une étude d'optimisation (Ity Optimization CIL), finalisée en septembre 2017, qui a permis d'améliorer significativement l'économie du projet grâce à l'intégration de réserves supplémentaires. En novembre 2017, le groupe ENDEAVOUR MINING CORPORATION prend le contrôle de la gestion de la SMI et débute donc en septembre 2017 la réalisation du projet Ity CIL et la première coulée d'or du projet Ity CIL a eu lieu le 18 Mars 2019. Le taux de récupération minimum de cette

nouvelle usine est de 83 %. Ce qui permettra de produire approximativement 204 000 onces d'or annuellement pour les 10 premières années d'exploitation.

Depuis janvier 2019, la SMI comprend trois (03) actionnaires à savoir :

- ✓ Endeavour Mining 85% ;
- ✓ Le gouvernement ivoirien 10% ;
- ✓ SODEMI 5%.

En Mai 2021, la SMI passe en production sous-traitée avec la cession des activités de production sur le permis d'Ity à l'entreprise SFTP Mining et à l'entreprise SMS sur le permis de Floleu. Le groupe ENDEAVOUR MINING détient quatre permis d'exploitation en Côte d'Ivoire (Ity, Daapleu, Floleu et Lafigué) ainsi que plusieurs mines dans la sous-région : au Burkina Faso (Houndé, Bongou), au Mali (Tabakoto), au Ghana (Nzema) et au Sénégal (Sabodala-Massawa).

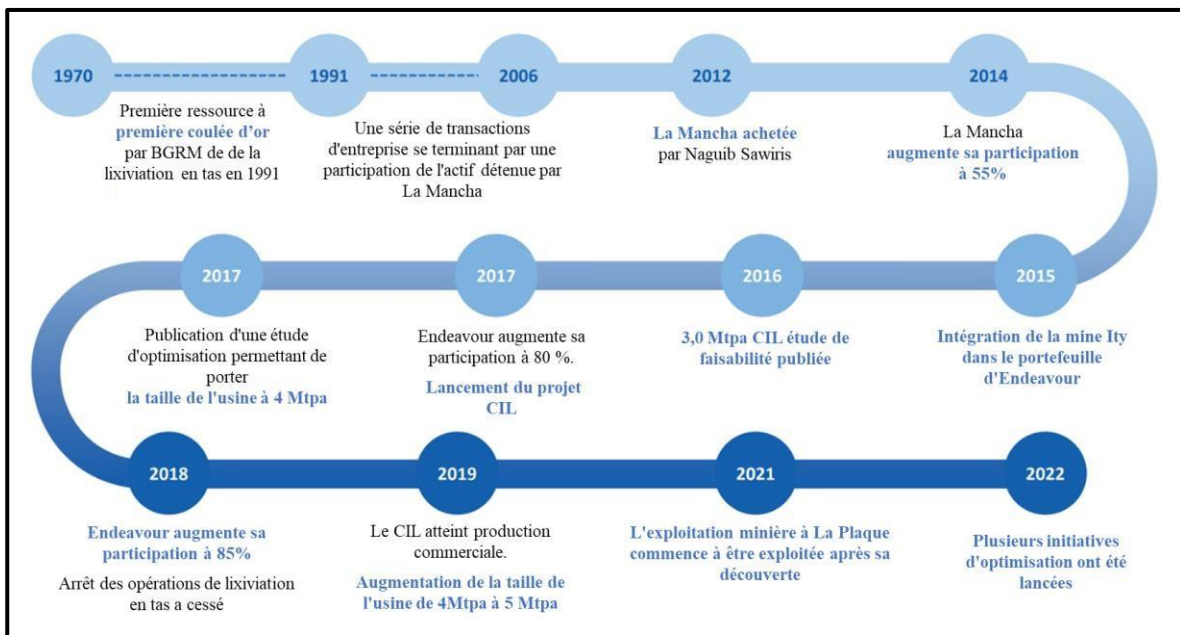


Figure 1: Historique de la SMI de 1970 à 2022

I.1.2. Organisation et activités

Dans l'optique de travailler de manière organiser, la mine d'or d'Ity a mis en place une structure organisationnelle qui met en évidence les liens fonctionnels, organisationnels et



hiérarchiques de l'entreprise de façon générale. Voici présenté l'organigramme (figure 2) de notre structure d'accueil :

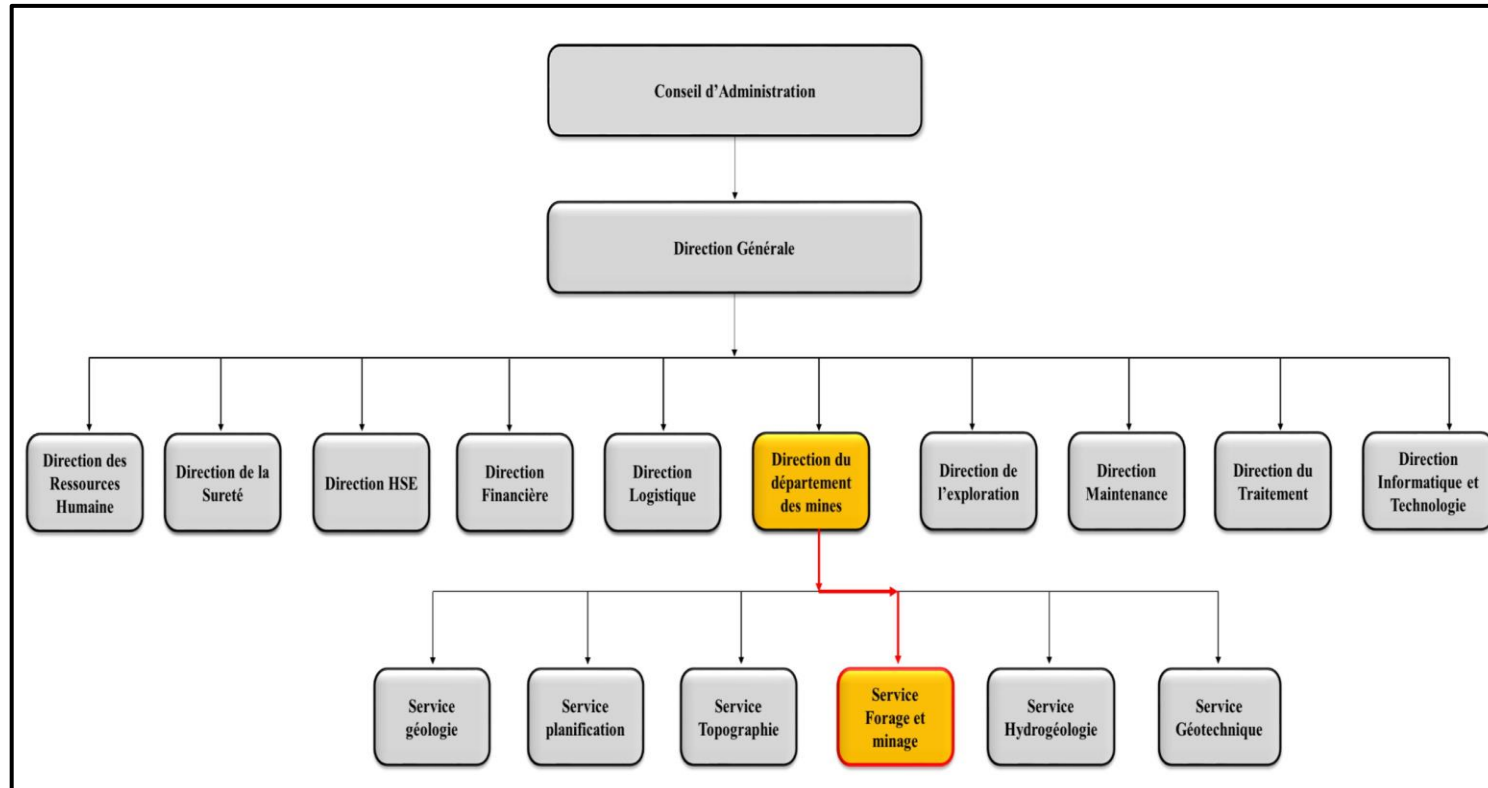


Figure 2: Organigramme de la société des Mines d'Ity



La structure organisationnelle est composée de dix (10) directions à savoir :

✓ Direction Administrative et financière

Elle s'occupe de la gestion des questions d'ordre administratif et comptable de même que la gestion du personnel pour le compte de la société.

✓ Direction des Ressources Humaines

La DRH assure et garantit la politique d'évolution et celle de formation de la société. Elle participe à la gestion et à la formation du personnel de l'entreprise.

✓ Direction Sureté

Elle a pour rôle de prévenir, de sécuriser et de protéger le personnel ainsi que les biens de l'entreprise. Cette direction est gérée par les sociétés P6.

✓ Direction Logistique

Elle assure de manière efficace l'approvisionnement et la gestion des stocks qui portent sur les biens et les services.

✓ Direction Informatique et Technologie

Cette direction doit s'assurer d'un choix ainsi que d'une utilisation cohérente et conviviale des logiciels de gestion et des équipements ou du matériel informatique. Elle assure également la maintenance des ordinateurs et des équipements technologiques.

✓ Direction Hygiène, Sécurité et Environnement

Elle est chargée de prévenir les accidents de travail, de fournir les Équipements de Protections Individuelles (E.P.I) à tout le personnel présent sur le site minier. Elle s'occupe également de l'hygiène de la mine et du réaménagement du site au fur et à mesure que se poursuit l'exploitation.

✓ Direction de l'Exploration



Cette direction a pour rôle de rechercher des indices de minéralisation pouvant aboutir à la découverte d'un gisement.

✓ Direction Production

Cette direction s'occupe de l'exploitation minière des différents gisements. Elle est composée de sept (7) services que sont:

- ✦ **le service Géologie** : chargé du contrôle géologique des teneurs tout au long du processus de l'exploitation minière ;
- ✦ **le service Topographie** : effectue les levés topographiques puis réalise la cubature des matériaux exploités ainsi que celle des stocks de minerai ;
- ✦ **le service Hydrogéologie** : chargé de l'exhaure et de l'exécution des plans de drainage du site minier ;
- ✦ **le service Géotechnique** : veille à la stabilité des talus des fosses exploitées;
- ✦ **le service Forage et Minage** : chargé du dynamitage des formations rocheuses affleurant au cours de l'exploitation minière ;
- ✦ **le service Planification** : définit les stratégies minières et élabore les plans miniers à court, moyen et long terme ;
- ✦ **le service Production** : met en exécution les plans miniers prédéfinis afin d'atteindre les résultats opérationnels escomptés ;

Notre stage s'est déroulé au sein du service Forage et Minage.

✓ Direction Maintenance

La direction maintenance s'occupe de l'entretien des engins, des véhicules légers ainsi que de divers appareils et installations. Elle doit également s'assurer de la disponibilité des engins de sorte à ne pas impacter de manière négative la production minière. À cet effet elle dispose de plusieurs services que sont :

- ✦ le service Électricité.



- ✦ le service Mécanique général.
- ✦ le service Mécanique des engins.

✓ Direction Traitement

Elle gère toutes les activités permettant de récupérer l'or contenu dans le minerai. Cette direction se subdivise en trois (3) services essentiels que sont :

- ✦ le service Métallurgie;
- ✦ le service Maintenance ;
- ✦ le service Laboratoire.

I.2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.

I.2.1. Cadre géographique

I.2.1.1. Localisation

Le site d'or d'Ity est localisé à l'Ouest de la république de Côte d'Ivoire, précisément dans la préfecture de Zouan-Hounien entre les latitudes $06^{\circ}53'30''$ et $06^{\circ}50'44''$ N, ainsi que les longitudes $08^{\circ}08'30''$ et $08^{\circ}05'46''$ W. On y accède par un réseau routier bitumé passant par Duékoué, Man, Danané et Zouan-Hounien ou un réseau non bitumé passant par Duékoué, Guiglo, Toulepleu et Zouan-Hounien. Cela dit, la préfecture de Zouan-Hounien est reliée à Ity par une piste de 15 km reprofilée et entretenue par la SMI. L'image de la figure 3 présente l'emplacement de la zone d'étude et la figure 4 présente l'emplacement du permis d'exploration et d'exploitation dudit site minier.



Figure 3: Carte de localisation et des voies d'accès de la zone d'étude.

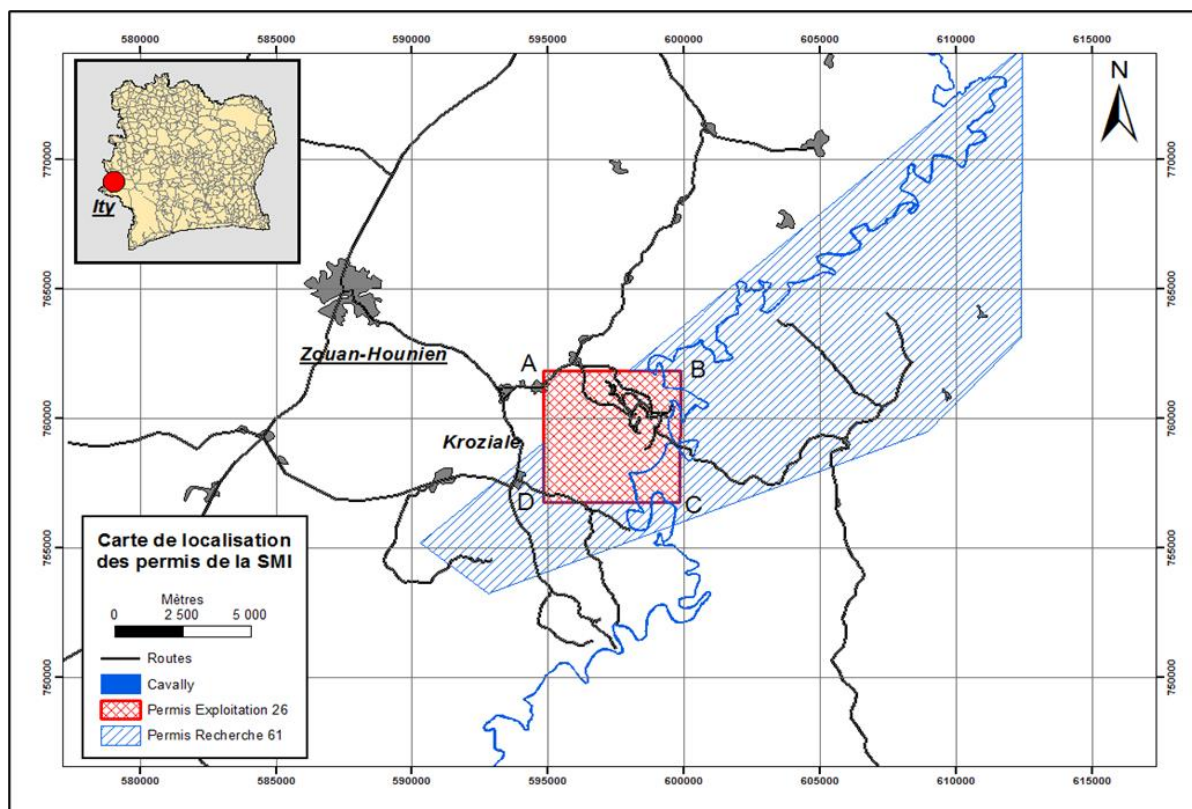


Figure 4: Carte de localisation des permis d'Ity (Teki, 2014).

I.2.1.2. Climat, végétation et pédologie

Les régions du Cavally et du Tonkpi sont soumises à un climat de transition de type équatorial. C'est une zone de forêt qui bénéficie d'une forte pluviométrie allant de 1500 mm à 2400 mm par an comme le présente la figure 5.

Elle a en effet quatre (04) saisons dans l'année :

- une longue saison sèche : de Décembre à Février ;
- une longue saison pluvieuse : de Mars à Juillet ;
- une courte saison sèche : d'Août à Septembre ;
- Une courte saison pluvieuse : d'Octobre à Novembre.

Ce climat est par conséquent caractérisé par une humidité relativement élevée (moyenne annuelle de 85%). La température, quant à elle, est assez constante tout au long de l'année et affiche une moyenne de 25°C avec une plage de +/- 5°C. La durée du soleil varie en moyenne entre 1500 et 2000 heures par année.

Sur le plan pédologique, la zone d'étude appartient à un environnement de sols ferralitiques typiques des régions de forêts denses. Le profil d'altération observé dans la zone d'Ity se compose de quatre horizons principaux, dont l'épaisseur varie en fonction des conditions morphologiques et de la nature des roches mères. Du sommet vers la base, on distingue successivement : un horizon gravillonnaire à blocs de cuirasse, un horizon contenant des éléments de cuirasse démantelée et des nodules polygéniques, un horizon argileux à plaquettes, et enfin une saprolite jaune pâle.

(Rapport ANTEA, 2007)

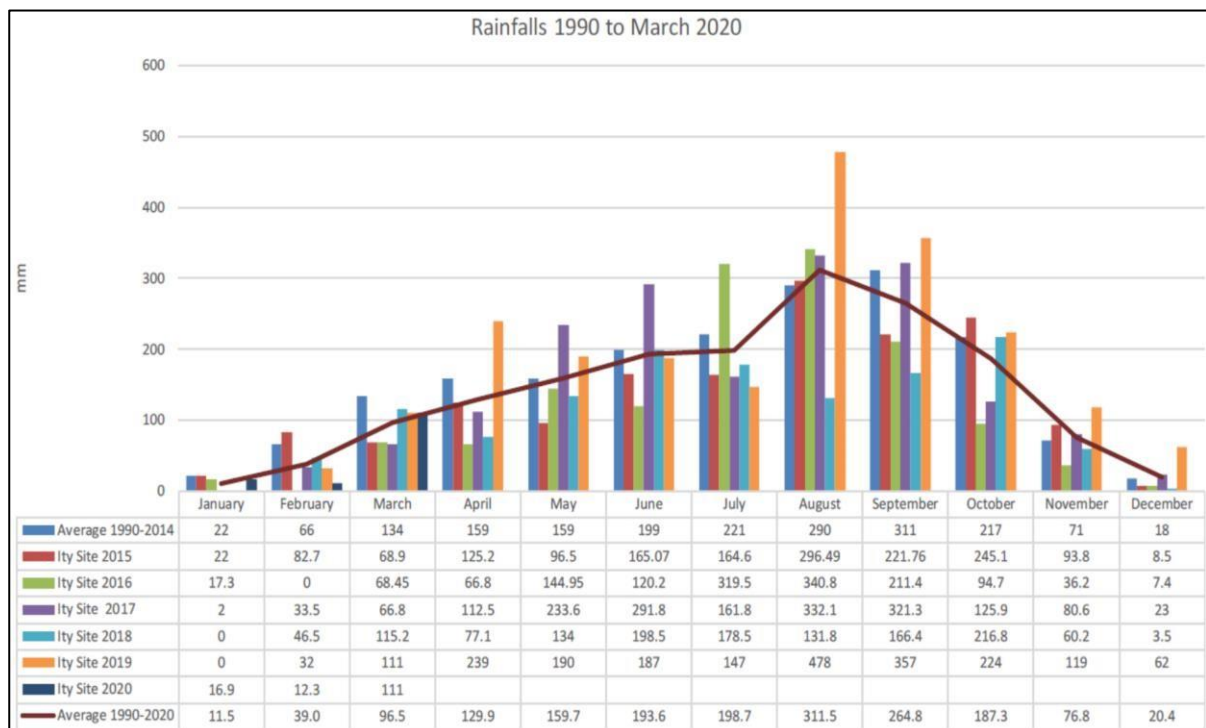


Figure 5: Moyenne par mois des précipitations enregistrées à Ity de 1990 à 2014

I.2.1.3. Relief et Hydrographie

L'aspect géomorphologique de la zone d'Ity se rapproche beaucoup des caractères d'une pénéplaine dominée par de petites collines : ce qui est propre aux zones de forêts tropicales humides. La mine d'Ity est située dans un bassin versant de surface 34,901 km² et un périmètre de 140,4 km. Elle est drainée par un important réseau fluvial constitué principalement des fleuves Cavally et Nuon (figure 6). Ces fleuves coulent respectivement dans les directions NE-SW et N-S, ces cours d'eaux possèdent de grands flats (ou bas-fonds) plus ou moins marécageux en saison pluvieuse. Les précipitations peuvent être abondantes et violentes, particulièrement entre Juin et Octobre, provoquant une gêne importante pour l'extraction du minéral.

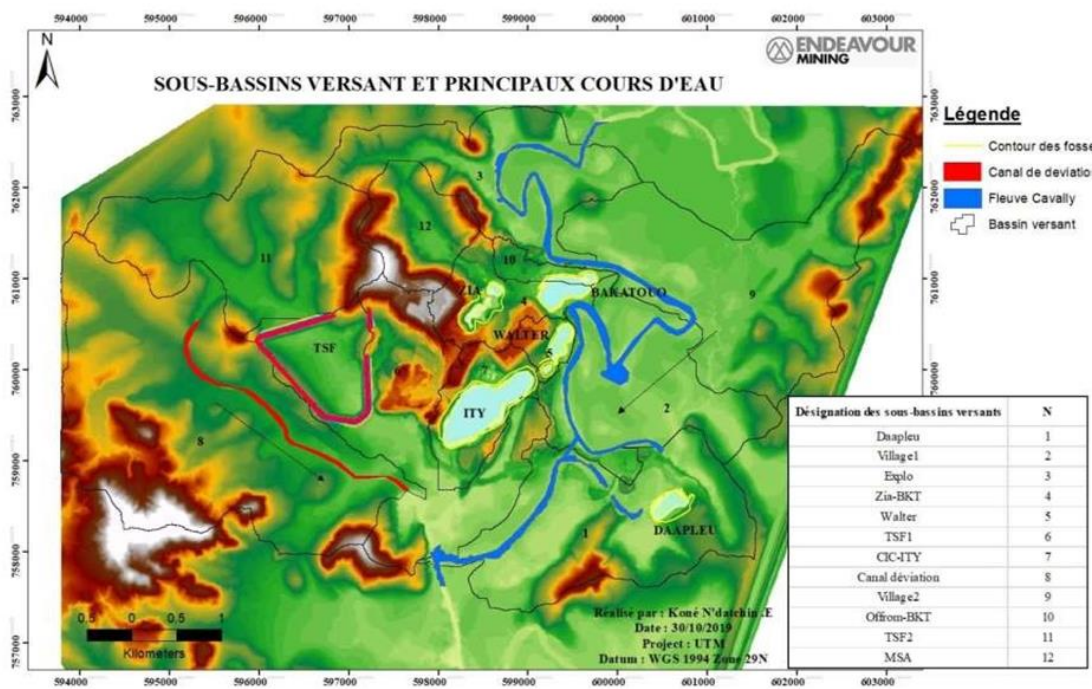


Figure 6: Sous-bassins versants et les principaux cours d'eaux d'Ity (Koné, 2019)



I.2.2. Cadre géologique

I.2.2.1. Géologie de la Côte d'Ivoire

La Côte d'Ivoire repose sur le craton Ouest Africain (figure 7) précisément sur la dorsale de Man (**Bessoles, 1977**) et présente deux ensembles géologiques bien distincts :

- ❖ D'une part, un étroit bassin côtier en bordure du golfe de Guinée qui se présente en forme de croissant. Ce bassin occupe 2,5 % de la superficie totale et s'étend de Fresco à l'Ouest jusqu'à Axim à l'Est (frontière du Ghana). Il est constitué de formations sédimentaires d'âge tertiaire-quaternaire.
- ❖ Et d'autre part, un socle précambrien subdivisé en deux domaines en fonction de l'âge des formations rencontrées : le domaine archéen et le domaine Paléoproterozoïque. Ces domaines sont séparés par la faille du Sassandra orientée Nord-Sud (**Bessoles, 1977**) qui serait d'après certains auteurs un accident profond. Elle serait prolongée au Nord par la faille de Zedness en Mauritanie et au Sud par celle de Guri au Venezuela en Amérique du Sud

I.2.2.1.1 Socle du précambrien

❖ Le domaine archéen

Le domaine archéen se situe à l'Ouest de la faille du Sassandra. Dans ce domaine appelé encore domaine Kénéma-Man, deux cycles orogéniques se sont manifestés :

- le léonien daté de 3500 à 2900 Ma,
- le libérien daté de 2900 à 2500 Ma.

Ces âges ont été obtenus à partir des datations radiométriques réalisées sur les formations qui sont dans ce domaine. Il s'agit essentiellement des gneiss gris tonalitiques, des charnockites, des roches vertes métamorphisées dans le faciès granulite, des quartzites rubanés à magnétite et des migmatites à biotite (**Camil, 1984**). Ces formations sont intrudées



par des granites roses et par des complexes basiques et ultrabasiques. Le domaine archéen occupe le Sud-ouest et l'Ouest du pays.

❖ Le domaine Paléoprotérozoïque

Le reste du socle ivoirien constitue le domaine protérozoïque ou domaine Baoulé-Mossi, structuré au cours du mégacycle Eburnéen et daté à 2500 – 1600 Ma (**Tagini, 1971 et Yacé, 1993**). Ce mégacycle Eburnéen est réparti en deux cycles distincts : le Burkinien et l'Eburnéen qui datent respectivement de 2400 – 2150 Ma et de 2150 – 1800 Ma. Il est composé de roches paléoprotérozoïque désignées sous le vocable des formations birimiennes généralement orientées NNE – SSW (**Tagini, 1971**). Signalons cependant qu'on rencontre quelquefois des formations archéennes dans le domaine protérozoïque, juste à proximité de la faille. Ces formations sont qualifiées de reliques archéennes (Kouamelan, 1996).

L'ensemble du domaine paléoprotérozoïque ou domaine Baoulé - Mossi est d'âge Birimien. Il existe également dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, un domaine mixte entre les deux domaines précédents appelé domaine SASCA dans lequel on distingue cinq (5) unités volcano-sédimentaires du mégacycle éburnéen avec une lithologie peu différente de celle connue à l'Est de la faille de Sassandra. Ce sont les unités de Toulepleu-Ity, Hana-lobo, Louga-Kounoukou, Monts Trou et de la Davo.

Les gisements aurifères ivoiriens (Tongon, Agbaou, Bonikro, Angovia, Aféma) sont généralement situés dans le domaine protérozoïque. Quant au gisement aurifère de Ity, il est situé dans le sillon de Toulepleu-Ity d'âge birimien (Feybesse et Milési, 1994 ; Feybesse et al. 1990) en plein domaine archéen.

I.2.2.1.2 Le bassin sédimentaire

Le bassin sédimentaire ivoirien occupe 2,5% du territoire et est d'âge Crétacé à Quaternaire (Touré et al., 2008). Il se divise en un bassin côtier (onshore) et en un bassin profond (offshore). La partie terrestre a la forme d'un croissant, centré sur Jacqueville, et s'étend de Fresco, à l'Ouest, à la frontière ghanéenne à l'Est sur environ 350 km.

Du point de vue structural, le bassin ivoirien est traversé par une grande faille E-W, appelée faille des lagunes. Au Nord de la faille des lagunes, le bassin contient des dépôts mio-pliocènes (Continental Terminal) composés de sable argileux, de sédiments sableux, de grès ferrugineux, de graviers (Tagini, 1971) en discordance majeure sur le socle, par l'intermédiaire des conglomérats. Au Sud, on a un fossé d'effondrement profond où le socle s'enfonce en profondeur, sous la mer : c'est le « trou sans fond » (Martin, 1970). Les formations les plus anciennes, d'âge Crétacé-Paléocène, sont constituées d'argile, de glauconites et de bitumes (Tagini, 1971). La figure 7 présente la géologie simplifiée du craton Ouest-Africain.

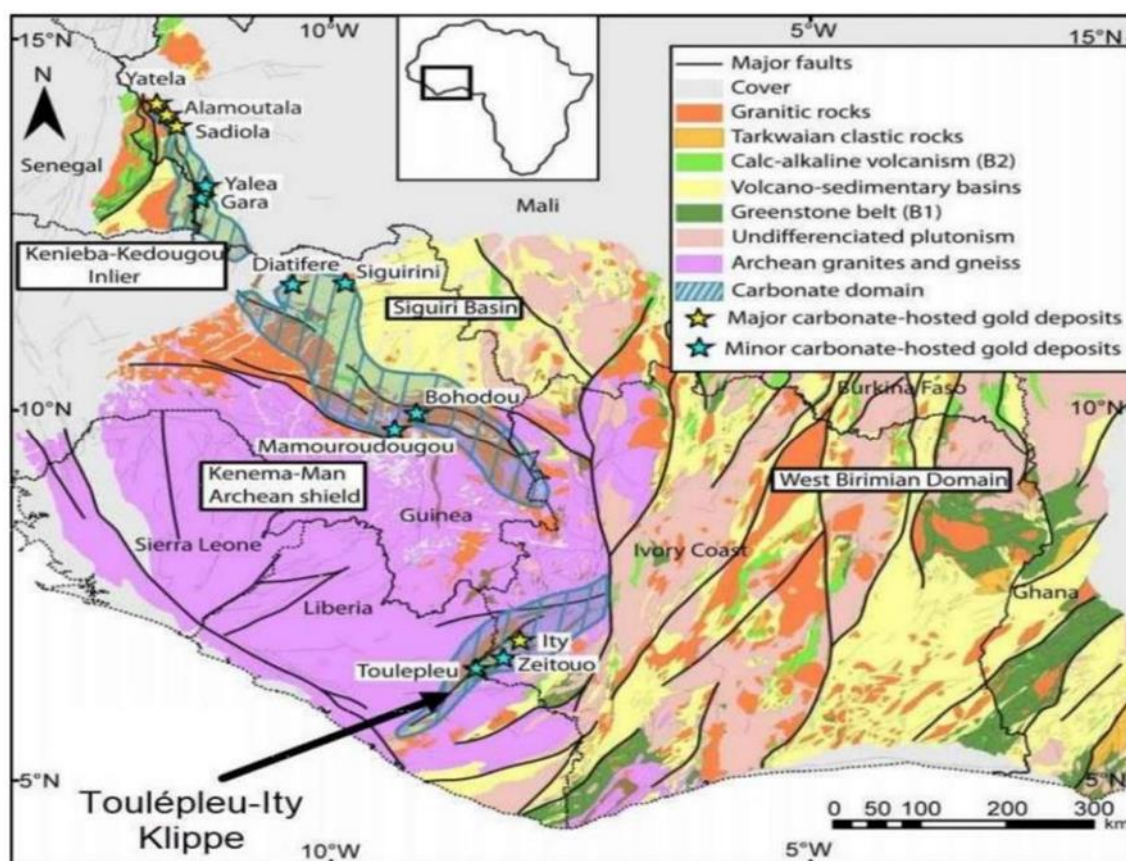


Figure 7:Géologie simplifiée du craton Ouest-Africain (Vic et Billa, 2015.)

I.2.2.2. Géologie locale

La géologie de la zone Ity est dominée par deux ensembles de roches birimiennes. Vers l'Ouest, des roches plutoniques et métamorphiques et vers l'Est, des méta-sédiments et des



paquets volcano-sédimentaires (figure 8). Les formations du Birimien recouvrent le socle archéen et ont été mises en place par des failles de poussée à échelle régionale. Elles correspondent à des "séries méta-sédimentaires" (pélites, grésopélites et carbonates) qui ont été soumises au métamorphisme de contact, où des stocks de sulfures et de magnétite accueillent des minéralisations aurifères. Ces caractéristiques s'accompagnent d'une altération hydrothermale et d'un métasomatisme important (Palanque, 2004).

La zone est aussi caractérisée par des carbonates et des méta-volcano-sédiments déformés, souvent recoupés par une série de corps granodioritiques. Les roches volcaniques sont des dépôts tufacés dont la composition varie de basique à acide. Les skarns se développent le long de zones intensément métasomatisées à proximité des intrusifs et toutes les formations ont été soumises à un métamorphisme régional.

La stratigraphie de la mine d'or d'Ity, des plus jeunes aux plus anciennes est la suivante :

- ❖ **La latérite** : quatre catégories de latérites ont été identifiées à Ity, tous les profils contenant des fragments de magnétite et de quartz à l'échelle millimétrique. La succession décrite ci-dessous a généralement une épaisseur inférieure à 10 m et comprend les éléments suivants :
 - les argiles latéritiques,
 - les graviers latéritiques,
 - les latérites mixtes,
 - les latérites tachetées.
- ❖ **La saprolite** : présentant une texture plastique et une taille de grain de 125 mm. On distingue:
 - les saprolites oxydées ou oxyde d'argile,
 - les saprolites réduites ou argiles rouges.

- ❖ **Rhyolite de Daapleu** : L'intrusif granitique de Daapleu est localement appelé rhyolite en raison à sa petite taille de cristal. La rhyolite est leucocratique (gris à blanc), microgranulaire, schisteuse et riche en séricite, contenant également de la pyrite ou de la magnétite à grain fin sous forme de disséminations ou hébergées dans des fractures.

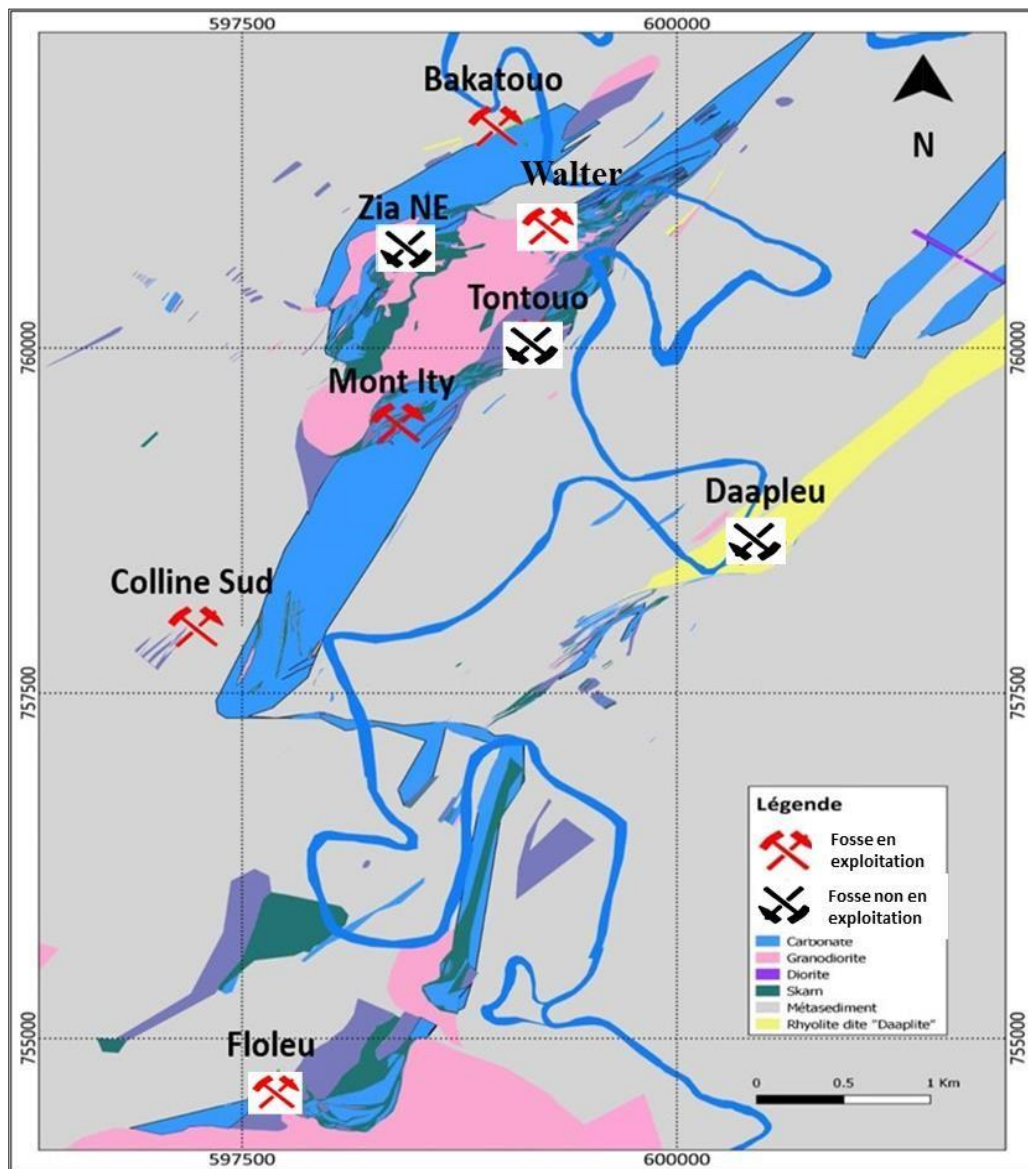


Figure 8 : Carte géologique de la zone d'étude (Endeavour Mining, 2020).



I-3 NOTION SUR LE THEME

I.3.1 Contexte du thème

Le thème qui nous est soumis s'inscrit dans une démarche amélioration continue. En effet, à la mine d'or d'Ity, pour des questions de sécurité, des zones d'exclusion ont été établies pour les engins ainsi que le personnel. Ces distances sont de 300 m pour les engins et 500 m pour le personnel. Par conséquent, ces distances ne tiennent pas compte de certains paramètres tels que la profondeur de la fosse, les paramètres de tir et le contexte géologique de la zone. C'est pourquoi il nous a été demandé de mettre en place un outil d'aide à la prédiction des projections des particules.

I.3.2 Question d'étude

Comment définir et ajuster les zones d'exclusion lors des tirs de mines en fonction de la profondeur, des paramètres de tir et des propriétés géomécaniques des roches ?

I.3.3 Méthode d'exploitation à la Mine d'Or d'ITY

Actuellement, la mine d'or d'ITY possède trois (03) fosses dans lesquelles les activités de dynamitage s'effectuent : LEPLAQUE, WALTER, BAKATOUO. Comme dans la plupart des mines d'or de Côte d'Ivoire, la méthode d'exploitation utilisée est l'exploitation à ciel ouvert comme représentée dans la figure 8. Cette méthode est privilégiée lorsque le gisement se trouve à des profondeurs relativement faibles et quand le coût du minerai utile extrait est inférieur à celui que nécessiterait une exploitation souterraine. L'exploitation à ciel ouvert consiste à enlever le stérile de recouvrement afin d'accéder au gisement. La technique utilisée est celle des fosses emboîtées. Une première fosse est créée suivie d'autres fosses qui s'emboîtent les unes aux précédentes. Le point le plus bas de l'exploitation correspond à la limite optimale économiquement rentable.

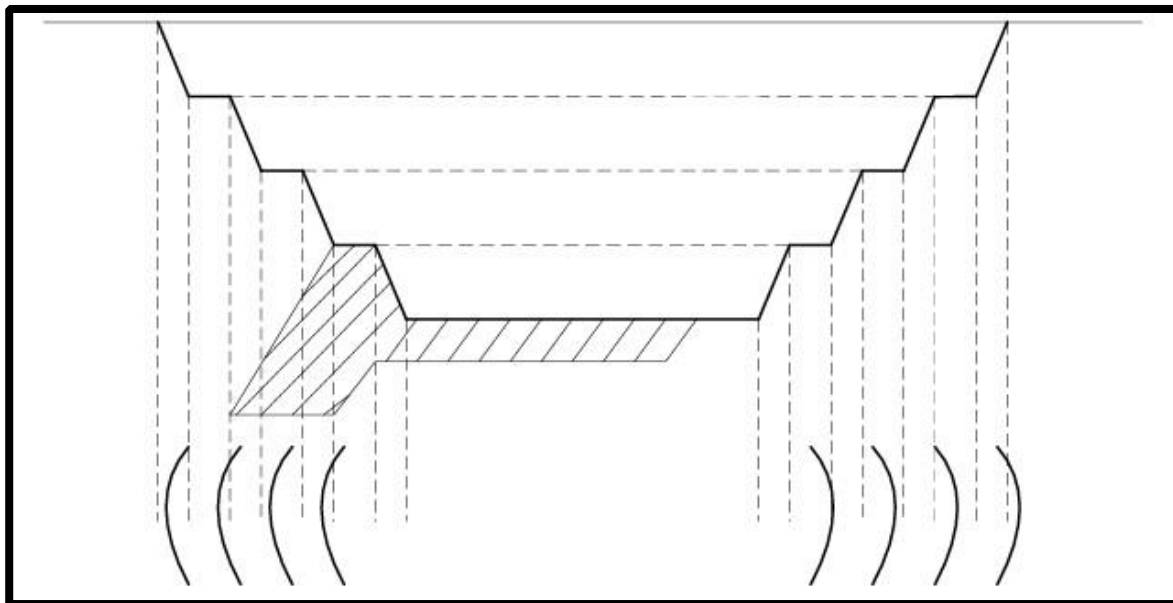


Figure 8: Méthode d'exploitation Minière par fosses emboîtées (Kamulete, 2014)

I.3.4 Procédure de tir à la mine d'or d'Ity

A la mine d'or d'Ity, plusieurs activités pré-blast sont réalisées le jour du tir, telles que la réunion de pré-blast, le vol de drone, une patrouille et la fermeture des accès afin de garantir le bon déroulement de l'opération de tir.

❖ La réunion de pré blast

Il s'agit d'une réunion qui regroupe l'ensemble des équipes ou services exerçant des activités sur le terrain, en particulier autour des fosses. Dans un premier temps, un courrier est adressé à tous les chefs de service afin de les informer de la tenue d'un tir dans une des fosses. La présence des superviseurs est donc obligatoire. Par ailleurs, un agent du ministère assiste à la réunion. Son rôle est de veiller au respect de la procédure dans son ensemble. L'objectif principal de cette rencontre est d'identifier toutes les équipes intervenant dans la zone de tir, de connaître l'heure à laquelle elles prévoient d'évacuer les lieux et de déterminer l'endroit approprié pour le stationnement de leurs équipements.

❖ Le vol de drone



Le vol de drone est réalisé par le service de la sûreté de la mine. Il a pour objectif de survoler les environs de la zone de tir afin de s'assurer que toutes les zones potentiellement impactées ont effectivement été évacuées.

❖ La patrouille

Elle est réalisée par l'équipe de forage et dynamitage, qui parcourt l'ensemble des zones potentiellement impactées par le tir afin de s'assurer que toutes les équipes intervenant dans la zone ont bien évacué leur personnel ainsi que leurs équipements. Pour ce faire, chaque superviseur confirme à la radio l'heure à laquelle son équipe et ses équipements ont quitté la zone.

❖ La fermeture des accès

Elle consiste à fermer toutes les voies permettant d'accéder à la zone de tir. Pour ce faire, des personnes appelées **blast guards** sont positionnées sur les différents accès menant à la zone. Ils disposent d'une radio et d'un mégaphone afin d'assurer efficacement leur mission.

I.4 NOTIONS SUR LES ZONES D'EXCLUSION

I.4.1 Définition

Elles peuvent être définies comme des zones temporairement interdites d'accès pendant les opérations de tirs (minage à l'explosif). Elles sont délimitées en fonction des risques liées aux projections de pierres, aux ondes de choc, aux vibrations et aux gaz de tir.

- Leur objectif est de prévenir les accidents humains, protéger les équipements et minimiser les dommages liés aux infrastructures.

Dans notre étude nous nous intéresserons aux projections des pierres.

I.4.2 Importance de la prédiction des projections de pierres

Les projections de pierres peuvent constituer un risque grave associé au dynamitage. De nombreux accidents de dynamitage causant des blessures, des dommages matériels à la mine sont causés par des fragments propulsés au-delà de la zone d'explosion. L'importance des dommages est fonction de la taille de l'élément projeté, de la vitesse et de l'angle de sa trajectoire. Ainsi, une bonne conception du plan de tir, une parfaite connaissance du terrain et des facteurs intervenants sont essentielles pour contrôler les projections excessives de



pierres. Cela revient donc à contrôler tous les paramètres intervenant dans les opérations de forage et dynamitage.

Il y a deux zones de projection qui peuvent être qualifiées de « normales » ou « excessives ». La zone normale de projection fait référence à la région où les projections devraient se produire, c'est-à-dire la zone à partir de laquelle le personnel est évacué avant le dynamitage et est bouclée pendant l'explosion.

La zone de projection excessive est celle au-delà de la zone protégée où ces projections se produisent anormalement.

Les projections de pierres sont la cause d'une trop grande énergie pour un certain bloc de matériau à dynamiter. C'est l'expulsion de cette énergie qui va créer les projections de pierres en fonction de l'intensité de celle-ci. Cette cause peut provenir de plusieurs facteurs dont la nature de la roche, les discontinuités dans la roche, le chargement des trous, les diamètres et profondeurs des trous, une hauteur de bourrage inappropriée et une banquette insuffisante. Généralement ceci se présente du fait de l'inadéquation entre l'énergie de l'explosif et la résistance de la masse rocheuse autour de l'explosif.

Les projections de pierres peuvent alors résulter de trois mécanismes qui sont :

- ✓ **L'explosion de face (face burning)** : L'éclatement de la face se produit pour des raisons telles qu'une charge insuffisante, une surcharge dans les zones de faiblesse ou les régions présentant des structures géologiques majeures. L'échappement des produits de détonation gazeux à haute pression de ces zones entraîne une surpression d'air, du bruit et des projections de roches (Amini et al., 2011 ; Ghasemi et al., 2012a).
- ✓ **L'explosion en forme d'entonnoir (Rifling)** : causée soit par une hauteur de bourrage jugée trop petite pour un diamètre de trou donné ou que le col du trou en question est assez faible (fracturé). Dans ce genre de cas il peut avoir projections de roches dans différents sens (différents angles) ; Le produit gazeux de la détonation peut s'échapper rapidement du trou de mine le long du chemin de moindre résistance, entraînant l'éjection du matériau de bourrage et de la roche de collet, ce qui conduit à des projections de roches. Les roches disproportionnées dans la colonne de bourrage peuvent devenir des projectiles mortels. L'effet de

fusil peut également être étroitement lié au mécanisme de surpression d'air (Amini et al., 2011 ; Ghasemi et al., 2012a).

- ✓ **L'explosion par une fente (Cratering) :** la hauteur de bourrage pour confiner la matière explosive est inefficace ou absente ; les gaz peuvent sortir par le haut. (Angle de 90 degrés avec l'horizontal) La formation de cratères se produit principalement en raison d'une longueur de bourrage insuffisante. Les produits gazeux de la détonation commencent à s'échapper rapidement par cette région, générant des cratères et des projections de roches. Des retards inter-rangées plus courts ou une initiation inappropriée des rangées de dynamitage peuvent également entraîner des effets similaires (Amini et al., 2011 ; Ghasemi HHet al., 2012). Ces formes de projections sont représentées dans la figure 9.

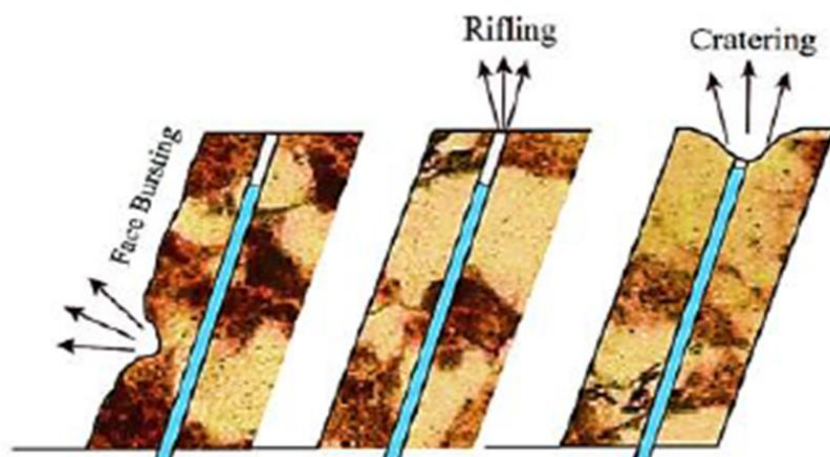


Figure 9: Mécanisme de projections de pierres (Zhou et al., 2019)

I.4.3 Impact des projections de pierres

Les projections de pierres issues des tirs de mines constituent un véritable danger pour la santé du personnel ainsi que les éléments environnants (figure 10). Voici ci-dessous quelques dangers que représentent ces projections de pierres :

- Blessure graves ou morts du personnel si des personnes se trouvent dans la zone de projections.
- Dégâts aux équipements miniers : foreuses, pelles, camions etc....

- Destruction des infrastructures.

Il faut noter que l'importance de ces dangers est fonction de la vitesse de déplacements des fragments, la taille des fragments et l'angle de projections de ces fragments.

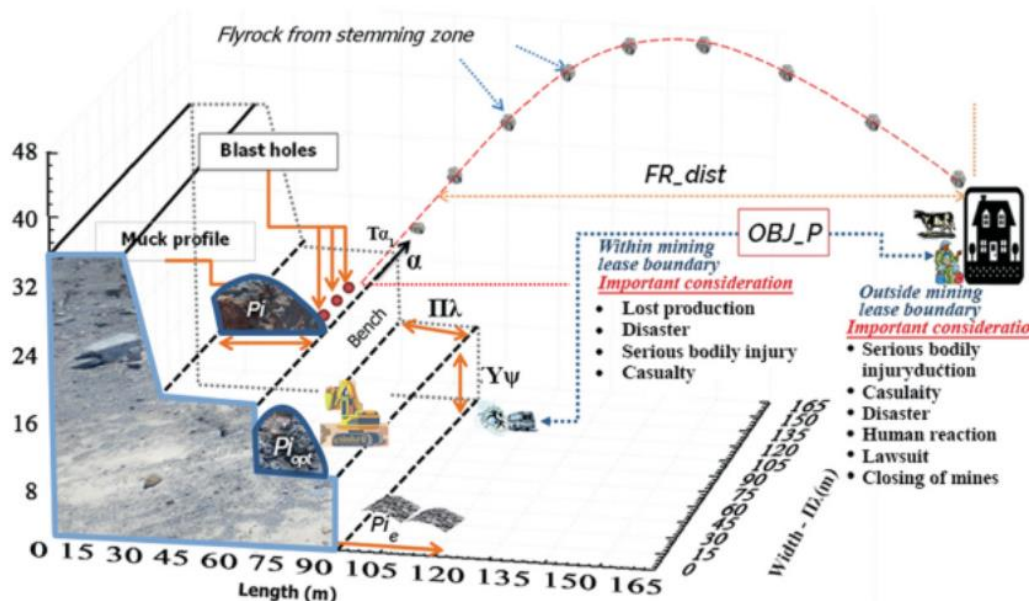


Figure 10: Illustration des jets de pierres et Impacts

Les fondements théoriques et principes clés de notre étude établis, nous mettrons en évidence le matériel ainsi que les méthodes utilisées pour mener à bien notre recherche dans le deuxième chapitre.



CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES



II.1 MATERIEL

Trois types de matériel ont été utilisés dans cette étude, à savoir :

- le matériel de sécurité ;
- le matériel technique ;
- le matériel informatique.

II .1.1 Matériel de Sécurité

La mine d'or d'Ity a une politique rigoureuse sur l'aspect santé et sécurité au travail si bien que les équipements de protections individuelles sont obligatoires afin d'accéder aux sites. L'objectif est de protéger tout le personnel et de réduire au maximum les risques auxquels ils peuvent être sujets. Il s'agit principalement de :

- vêtements à bandes réfléchissantes qui permettent d'être aperçu à une distance considérable et de se protéger le corps ;
- chaussures de sécurité pour la protection des pieds ;
- casque pour la protection de la tête contre des chutes de pierres et d'autres objets ;
- lunette pour la protection des yeux
- bouchons d'oreilles : protéger les oreilles contre les bruits nocifs.

II.1. 2. Matériel Technique

- **Le document relatif à la procédure de tir** : il nous a permis d'avoir les informations sur la définition des distances de sécurités au sein de la mine ;
- **Rapport géotechnique et géologique** : ils nous ont permis de mettre en évidence la lithologie et les différents minéraux de la Mine d'or d'ITY, connaître les paramètres liés à la densité des massifs rocheux dans la mine ;
- **Fichier string et DTM** : ce sont des fichiers numériques qui nous ont permis de définir les sections. Le fichier string est le format d'enregistrement utilisé pour



stocker des informations dans le logiciel Surpac. Le fichier String contient des informations sur les coordonnées d'un ou plusieurs points. Un fichier DTM (Digital Terrain Model) est généré à partir du fichier String.

- **Le sismographe :** Un **sismographe** est un instrument de mesure équipé d'un capteur des mouvements du sol, le **sismomètre**, capable de les enregistrer sur un support visuel, le **sismogramme**. Il est constitué d'un socle solidaire du sol, sur lequel est fixé un cylindre enregistreur et d'un pendule qui du fait de sa très grande masse est pratiquement immobile. Lors d'une secousse, le socle est brutalement déplacé par les mouvements du sol et le stylet attaché au pendule inerte inscrit les vibrations sur un cylindre enregistreur tournant.

Les sismographes modernes fonctionnent différemment : le déplacement est converti en courant électrique. Les signaux ainsi produits sont transmis et enregistrés dans des stations de surveillance.

II.1.3. Matériel Informatique

- **Surpac :** GEOVIA Surpac est un logiciel complet et modulaire de modélisation géologique 3D et de planification minière (à ciel ouvert et souterraine), développé par Dassault Systèmes. Il nous a permis de définir les sections des fosses et de déterminer les distances d'exclusion.
- **Excel :** Le logiciel Excel 2021 de Microsoft Office a été utilisé pour la conception du modèle, le calcul des paramètres optimaux, la représentation graphique des différentes sections faites sur le logiciel Surpac et aussi la matérialisation des différentes portées.

II .2 METHODES

La méthodologie utilisée pour atteindre notre objectif général s'articule autour des étapes suivantes : d'abord une recherche bibliographique a été réalisée, suivie d'une étude de l'existant consistant à faire une analyse de la gestion actuelle des zones d'exclusion, ensuite une identification des paramètres pouvant influencer la projection des pierres et enfin, une phase de modélisation et estimation des distances de sécurité.



II.2.1 Recherche bibliographique

Dans cette recherche bibliographique, plusieurs sources et types de document ont été utilisés pour fournir une bonne base théorique et solide.

II.2.2 Faire une étude de l'existant

II.2.2.1 Présentation du dispositif actuel de la zone d'exclusion

Dans l'état actuel de l'exploitation, les zones d'exclusion sont définies principalement selon deux (02) rayons de sécurité : un rayon de 300 m imposé aux équipements (pelles hydrauliques, camions, foreuses) et un rayon plus large, généralement de 500 m, utilisé pour le personnel. Cette délimitation est appliquée de manière uniforme à tous les tirs, qu'ils s'agissent de tirs de production, de prédécoupage, de corrections ou d'autres tirs. La zone est définie sous forme circulaire. Cette approche présente l'avantage de la simplicité mais ne tient pas compte de certains paramètres tels que la profondeur de la fosse, la position du tir dans la fosse. Il faut souligner que ces distances sont utilisées conformément au document de la procédure de tir qui fixe à 300 m la distance dite sécuritaire pour les engins et 500 m celle dite sécuritaire pour le personnel.

II.2.2.2 Préparation du tir

Le processus par lequel s'effectue les tirs à la mine d'or d'Ity se déroule en plusieurs phases :

- ❖ Définition de la volée de tir à dynamiter
- ❖ Vérification des conditions géotechniques
- ❖ Design de la volée
- ❖ Implantation des points à forer
- ❖ Forage
- ❖ Dynamitage

Cette étude des étapes de tir nous permettra de mettre en évidence les paramètres utilisés pour le dynamitage.



II.2.2.2.1 Paramètres de forage et dynamitage

❖ Paramètres de forage

- Diamètre des trous

Les diamètres utilisés à la mine d'or d'Ity sont sous trois (03) variantes : les diamètres de 115 mm, 127 mm et 140 mm. Parmi ces diamètres, ce sont les diamètres de 127 mm et de 140 mm qui sont utilisés pour la foration des trous destinés à la production.

Il existe plusieurs types de tirs en fonction de leur position dans la fosse ou de leur utilité, on a en outre :

- **les tirs de production** : ils ont pour rôle de fragmenter le matériau n'arrivant pas à être minier par la pelle et aussi d'alimenter l'usine de traitement en minerais. Ils sont généralement plus loin du mur ; à une distance estimée à plus ou moins 30m.
- **les tirs de prédécoupage** (Presplit) : c'est une technique de tir de mines qui va consister à forer une ligne de trou rapprochés (1 m) et les charger avec des gommes afin de créer une fracture dans la roche avant le tir principal.

Plusieurs rôles sont à son actifs :

- Contrôle des parois
- Réduction de la sur-rupture (over break)
- Améliore la stabilité à long terme
- Optimiser la sécurité et l'environnement

Pour résumer, les tirs de pré-découpage ont pour rôle principal d'assurer un contrôle géométrique et géotechnique du massif rocheux en fixant une limite de rupture avant le tir.

- **Les tirs de trimes** : ce sont les tirs effectués aux murs. Ils sont effectués en général lorsque la distance entre la première ligne de production et le mur est inférieure de 25m. l'objectif principal est de dégager le matériau du mur. Ils comprennent les trous de Buffer, de Stab et de production. Dans certains cas, il peut avoir la présence de trou de crête, et de berme.

- La maille de foration



La maille de foration est le couple banquette-espacement. Elle dépend surtout de la taille du carreau à abattre et du type de matériau en place. La banquette (B), est définie comme la distance entre deux (2) rangées consécutives de trous de mine. Elle est l'un des paramètres les plus importants dans la conception d'un plan de tir. Quant à l'espacement (E), c'est la distance qui sépare deux (2) trous de mine consécutifs d'une même rangée. Dans le forage, il existe plusieurs types de mailles :

- rectangulaire ($E \neq B$) ;
- carrée ($E = B$) ;
- Quinconce ou maille triangulaire.

A la mine d'or d'Ity, la maille quinconce est celle utilisée.

- La profondeur des trous

La profondeur des trous de mines est égale à la hauteur du front de taille à exploiter et celle de la surforation. La hauteur du banc d'exploitation, est la distance verticale séparant deux niveaux relatifs horizontaux (inférieur et supérieur) de la fosse d'exploitation. Elle est choisie non seulement en fonction du fardeau ou banquette qui est la distance entre le front de taille et le 1^{er} trou de mine, mais aussi du diamètre du taillant de la foreuse.

- Surforation

La surforation est la distance forée en dessous de la profondeur que l'on veut atteindre après le sautage. Elle favorise une bonne distribution d'énergie dans les trous et une bonne excavation du matériau. Elle permet avoir une surface relativement plane après excavation et est généralement de 1m pour les trous de profondeur 10m et 0.5m pour les trous de profondeur moyenne 5m. La surforation est déterminée selon la formule suivante (équation 1) :

$$S = (0,2 \text{ à } 0,3) * B$$

Équation 1

❖ Paramètres liés au dynamitage

- La charge linéaire

La charge linéaire est la quantité d'explosif par mètre. Elle se calcule avec la formule suivante de l'équation 2 suivante :

Q_l : La charge linéaire en kg/m

$$Q_l = \pi \frac{D^2}{4000} d$$

➤ d: densité du produit

Équation 2

➤ D: diamètre du trou

Ainsi la charge par trou se calcule

$$Q_t = Q_l \times h_c$$

Équation 3

Avec h_c la colonne de charge (m) et Q_t en kg

- La charge spécifique

La charge spécifique est la quantité d'explosif nécessaire pour fragmenter un mètre cube de matériau. Elle s'exprime en kilogramme (kg/m^3) et se calcule comme suit à partir de l'équation 4 :

$$Q_s = \frac{Q_t}{V_t}$$

Équation 4

- Q_s la charge spécifique,
- V_t le volume du trou

Le dynamitage se fait selon plusieurs étapes que sont : le chargement des trous, le bourrage, la connexion et la mise à feu.

Le chargement des trous de mine débute par l'amorçage, qui consiste à relier un cordeau détonant à un booster placé au fond du trou. On distingue deux types de détonateurs : de



surface et de fond de trou, ce dernier contenant un explosif primaire (plomb) et un explosif secondaire (pentrite). Après l'amorçage, intervient le pompage de l'explosif, assuré par une Unité Mobile de Fabrication d'Explosif (UMFE) qui injecte l'émulsion requise dans chaque trou selon le diamètre, la densité de l'explosif et la hauteur de bourrage prévue. Avec une densité de $1,15 \text{ g/cm}^3$, la charge linéaire est d'environ $14,57 \text{ kg/m}$ pour les trous de 127 mm et $11,94 \text{ kg/m}$ pour ceux de 115 mm . L'émulsion Blendex 80/20, composée de 80 % de matrice et 20 % de nitrate d'ammonium, est utilisée pour les tirs de production, découpage et amortissement. En revanche, les trous de prédécoupage (presplit) sont chargés uniquement avec de l'émulsion encartouchée (NITRAM ou EXPLUS) et ne sont pas bourrés.

Après le chargement, une première mesure de la hauteur de bourrage est faite pour vérifier le respect des spécifications. Après 45 minutes, le temps nécessaire à la gazéification de l'émulsion, une deuxième mesure est effectuée pour confirmer l'atteinte de la hauteur de bourrage finale recommandée.

❖ Phase du bourrage

Après une dernière vérification de la hauteur du bourrage appelé le bourrage final, le trou est refermé avec un matériau de bourrage. L'utilisation de matériau de bourrage pour remplir la partie supérieure du trou de production au-dessus du produit (blendex) permet de confiner l'énergie libérée par celle-ci afin d'accroître son action dans la masse rocheuse. A la mine d'or d'Ity, le matériau de bourrage recommandé est du gravier anguleux et de taille homogène. La dimension requise de gravier est de l'ordre 0.12 à 0.15 mm pour favoriser un bon confinement de l'énergie.

❖ Phase de connexion et de mise à feu

La connexion est une opération consistant à relier les détonateurs NONEL (Non électrique) de fond de trou entre eux par l'intermédiaire de détonateur Nonel de surface. Elle nécessite un plan à suivre qui est établi à travers des logiciels. Il est caractérisé par deux (02) éléments principaux que sont :

- Le point d'initiation qui définit le point à partir duquel le feu commencera ;



- La ligne de contrôle qui est directement relié au point d'initiation, c'est cette ligne qui partagera le feu aux détonateurs. Après la connexion, on ordonnera la mise à feu après évacuation de la zone impactée.

II. 2.2.3 Représentation des distances d'exclusions

La représentation des distances d'exclusion se fait à travers le logiciel SURPAC selon les étapes suivantes : d'abord, afficher la volée de tir, déterminer le centroïde de la volée, ensuite trouver la distance entre le centroïde et les points extrêmes de la diagonale, entrer ces distances, visualiser le cercle obtenu et faire une extension du cercle par la suite.

- Afficher le design de la volée ;
- Déterminer le centroïde de la volée ;
- Trouver la distance entre le centroïde et les points extrêmes de la diagonale ;
- Visualiser le cercle ;
- Faire une extension du premier cercle obtenu.

Ces distances sont les standards adoptés à la mine d'or d'Ity ne tenant pas compte de la lithologie, ainsi que les autres paramètres pouvant affecter la distance de projection des fragments. Après avoir défini les zones à évacuer sur le logiciel, faudrait que toutes les parties prenantes (Partenaires) approuvent la carte effectuée. Lors de la signature, les parties prenantes ont souvent tendances à se plaindre du fait de la position éloigné de leur équipement compte tenue de la nature du matériau à dynamiter.

II. 2.3 Identification des paramètres influençant la projection des fragments

Cette identification permet de mettre en évidence les différents paramètres qui interviennent lors des activités de dynamitage pouvant impacter la distance de jets de fragment issue d'un tir. Plusieurs études ont été réalisées sur la projection des particules lors des tirs de mines. Les principales causes susceptibles d'augmenter le risque de projection des fragments sont en autres : un mauvais choix des délais d'explosion, un schéma de forage inadapté, une charge



excessive, le diamètre de trou de mine, les propriétés du massif rocheux, les structures géologiques et anomalie géologique, un mauvais bourrage ou bourrage insuffisant. Ces facteurs ont été largement documentés dans la littérature classique et contemporaine sur le tir de mines, notamment par **Langefors & Kihlström (1963)**, **Holmberg & Persson (1976)**, **Roth (1979)**, **Persson et al. (1994)**, **Adhikari (1999)**, **Kecojevic & Radomsky (2005)**, **Mohamad et al. (2013b)** et **Mohamed et al. (2018)**.

Selon (**Bajpayee et al., 2004**, **Mishra and Rout, 2011** ; **Murlidhar et al., 2020**), la définition de la zone exclusion est majoritairement fonction de la propriété de la roche, la géologie du terrain, les paramètres de tir et les propriétés de l'explosifs.

Ils peuvent être classés en deux (02) catégories : les paramètres contrôlables et les paramètres incontrôlables.

II.2.3.1 Paramètres contrôlables

❖ Diamètre des trous

Le diamètre de trou est défini de sorte que la charge utilisée donne la fragmentation voulue. Chaque diamètre de trou correspond à une charge linéaire bien définie. Augmenter cette charge définie pour un type de trou pourrait causer des surcharges et conduire à des projections de pierre sur de grande distance.

❖ Profondeur des trous

Un trou de mine de profondeur différente à celle planifiée pourrait jouer sur la hauteur de bourrage en ce sens que si la hauteur est différente de celle planifiée et que la quantité d'explosif n'est pas corrigée en fonction, l'on aura une hauteur de bourrage plus petite ou plus grande. Avoir une hauteur de bourrage plus petite peut provoquer des projections de pierres car le confinement de l'énergie n'est pas optimal.

❖ Taille des fragments de roches

La taille maximale de fragments produite dans les tirs est rarement évoquée en détail.

Il est admis que ce paramètre est fortement influencé par la configuration géologique in situ et la quantité d'explosif utilisée. La maille utilisée dans la confection de la volée de tir peut



aussi influencer la taille de ces fragments. Une maille trop grande pourrait susciter une forme plus grande des fragments.

❖ La hauteur de bourrage

La hauteur de bourrage représente la longueur de gravier qu'il faut appliquer pour assurer un niveau de confinement efficace de l'énergie dans le trou de forage. Lorsque cette hauteur n'est pas atteinte, cela aura un impact sur la qualité de fragmentation et peut favoriser la présence de fumée orange brun marquant la présence d'un mauvais confinement de l'explosif.

II.2.3.2 Paramètres incontrôlables

❖ Nature du matériau

La nature des matériaux fait référence aux types de roches rencontrés dans les différentes fosses d'exploitation de la mine d'or d'Ity. Ces fosses présentent une hétérogénéité géologique marquée, avec la présence de formations telles que le **SKARN**, la **GRANODIORITE** et les **CARBONATES**. Selon la position dans le massif en zone de transition ou en roche saine, le comportement des matériaux sous l'effet du dynamitage varie, notamment en ce qui concerne le niveau de projection des fragments. Ce comportement est directement lié aux propriétés géomécaniques des roches. Les essais mécaniques réalisés, ainsi que les mesures physiques effectuées sur différents échantillons prélevés sur site, ont permis de déterminer les principales caractéristiques géotechniques des matériaux, notamment leur densité.

Les densités des différentes couches se présentent comme suit :

- **La couche oxyde** : 1.83, l'exploitation se fait qu'à coup de pelles d'excavatrice ;
- **la couche de transition** de densité 2.5 ou 2.4;
- **la roche dure** de densité 2,8.

Ce sont respectivement sur les deux (2) dernières couches évoquées que notre étude se portera.



❖ Discontinuités structurales

La présence de fractures sur une volée engendre des fuites du produit lors du chargement de l'explosif dans les trous de mines. Ces discontinuités se caractérisent par les zones de cisaillement. Ces fuites ont tendance à remplir les fractures d'explosif et créer des zones de surcharges. L'excès d'explosif pourrait causer des projections de pierres du fait d'une trop grande énergie dans le rayon d'action du trou. Ces zones à discontinuités ont tendances à réduire l'énergie de Gaz ce qui défavorise la fracturation optimale du bloc

II.2.4 Détermination du Modèle de prédiction des projections de roches

II.2.4.1 Modélisation de la projection de pierres

L'étude de la projection des pierres, représentant un enjeu majeur pour la sécurité dans les opérations de minage, a fait l'objet de nombreuses recherches. Deux approches principales ont été développées pour modéliser ce phénomène historiquement.

Une première approche utilise les équations cinématiques simplifiées pour décrire le mouvement des fragments de roches après leur éjection. Des chercheurs comme **Roth (1981)**, **Workman & Calder (1994)**, et plus récemment **Richards & Moore (2006)** ont contribué à cette méthode.

Une seconde approche, plus complexe, emploie des équations de mouvements plus réalistes pour prédire la trajectoire et la portée des projections. Les travaux de **St George & Gibson (2001)** et de **Chernigovskii (1985)** sont représentatifs de cette méthode plus sophistiquée.

Pour notre étude, la simulation se base sur les équations de mouvement réalistes proposées par **Chernigovskii (1985)**, qui intègrent l'influence de la résistance de l'air sur la trajectoire des particules. Ce modèle est couplé aux équations de profondeur d'enfouissement développées par **Lundborg et Chiappetta (1983)**, permettant une simulation plus précise des conditions initiales d'éjection.



II.2.4.2 Analyse comparative des approches réaliste et cinématique pour la prévision des projections

La question d'évaluation des risques engendrées par les projectiles issues des tirs de mines se résume à déterminer les distances maximales à laquelle ceux-ci peuvent se retrouver. Cette distance sera fonction de certains paramètres tels que la conception et des types de tirs qui sont pratiqués (corrections ou volées normales). Cela conduit inévitablement à des méthodes d'estimation des vitesses d'éjection et des distances de projection résultantes de fragments de différentes tailles, et faire des recommandations sur la conception du tir en fonction des vitesses de projection estimées des fragments.

Un modèle de projection de pierre fiable doit donc pouvoir fournir des estimations raisonnablement précises des vitesses de projection et distance de projection, idéalement en fonction de la taille des fragments et de la conception du tir.

II.2.4.2.1 Approche réaliste (ou physique)

L'approche réaliste repose sur une modélisation physique détaillée du processus de fragmentation et de projection des roches. Elle prend en compte les propriétés géomécaniques des matériaux (densité, résistance à la compression, ténacité, etc.), les conditions de chargement (quantité d'explosif, géométrie du trou de mine, confinement) ainsi que les interactions sol-roche-explosif, elle favorise :

- Prédiction plus fiable et précise des distances de projection.
- Intègre des données géotechniques réelles, issues d'essais en laboratoire ou in situ.
- Permet d'analyser l'influence de chaque paramètre (type de roche, conditions de confinement, etc.).
- Convient bien pour des études de sécurité et d'optimisation fine du dynamitage.

II.2.4.2.2 Approche cinématique

L'approche cinématique repose sur une simplification des lois de la physique, en assimilant la projection à un mouvement parabolique soumis uniquement à l'accélération

gravitationnelle. Les paramètres principaux sont : la vitesse initiale de projection et l'angle de tir. Cette méthode ne modélise pas la fragmentation, mais uniquement le trajet balistique. La figure 11 montre la différence entre l'approche réaliste et l'approche cinématique, où la forme de la particule a un impact significatif sur sa distance de projections.

Nous nous trouvons dans une situation où, deux particules de tailles différentes présentant une même vitesse, le modèle cinématique prévoit une distance maximale de 500 m pour toutes les tailles de fragments, tandis que pour les modèles réalistes, la distance maximale de projection dépend fortement de la taille des particules. Pour un fragment de 50 mm, la projection maximale décrite est de 120 m alors que pour une autre taille de 250 mm, la projection maximale est de 280 m.

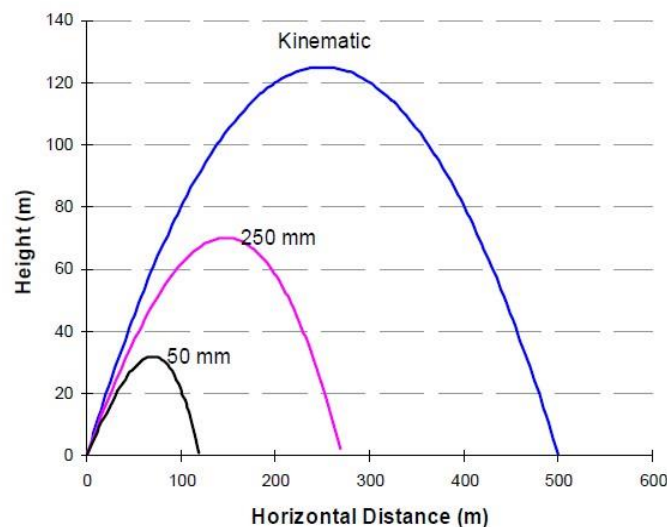


Figure 11: Modèle réaliste et le modèle cinématique (McKenzie, 2013 pages 2)

II.2.4.3 Vitesse de projection des particules

L'équation développée pour décrire la vitesse initiale des fragments projetés a été établit par **Lundborg (1974), Lundborg et al. (1975)**, à la suite d'une série expérimentale et théorique du comportement des pierres projetées lors des tirs à l'explosif sous l'effet de la résistance de l'air est la suivante (équation 5) :

$$V_o = 15.334 * \left[\left(\frac{x_f}{F_s} \right) * \left(\frac{\rho_r}{2.6} \right) \right]^{0.5}$$

Équation 5

- $X_f(m)$ taille des particules ;
- $V_0 (m/s)$ vitesse de projection ;
- $\rho_r (g/cm^3)$ densité de la roche,
- F_s : facteur de forme.
- 15.334 : constante de McKenzie.

II.2.4.4 Equation du mouvement de la particule avec résistance à l'air selon Chernigovskii

Les équations 6, 7, 8, 9, 10 mettant en évidence la trajectoire des particules se décrivent comme suites :

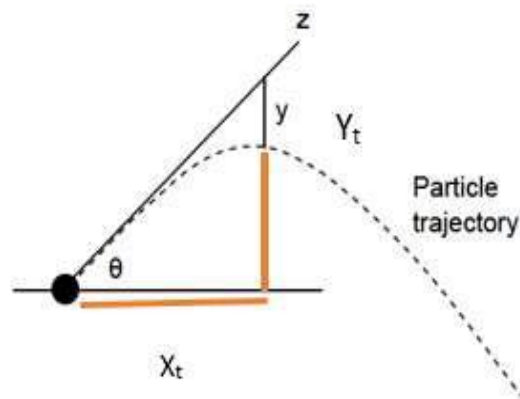


Figure 12: Trajectoire de la particule d'énergie (Cameron McKenzie, 2013 pages 3)

$$Z = \frac{x_f \rho_r}{F_s} \ln \left(1 + \frac{F_s}{x_f \rho_r} v_0 t \right)$$

Équation 6

$$Y = \frac{x_f \rho_r}{F_s} \ln \frac{e^{2t \sqrt{\frac{F_s}{x_f \rho_r} g} + 1}}{2e^{2t \sqrt{\frac{F_s}{x_f \rho_r} g}}}$$

Équation 7

$$X_f = 2.82 * SD^{-2.167} * \phi^{0.667} * F_s^{0.333}$$

Équation 8

$$X_t = Z * \cos(\theta)$$

Équation 9

$$Z_t = Z * \sin(\theta) - Y$$

Équation 10

- V_o (m/s) : vitesse de lancement de la particule ;
- F_s : facteur forme ;
- X_f (m) : taille de la particule ;
- ρ_r (g/cm³) : densité de la roche
- Θ (rad) : angle de projection de la particule.
- Φ (m) : diamètre du trou.
- Z (m) : distance mesurée dans la direction de projection de la particule ;
- Y (m) : la distance de chute de la particule mesurée verticalement ;
- Y_t (m) : ordonné de la particule ;
- X_t (m) : abscisse de la particule.

II.2.4.5 Détermination de l'enfouissement du bourrage

La profondeur d'enfouissement d'une charge a été déterminé par **Chiappetta (1983)** par suite d'expériences. Cette méthode permet de déterminer la hauteur de bourrage la plus optimale pour un trou donné afin de favoriser un bon confinement de l'énergie et donc une bonne fragmentation et moins de projections. Cette formule empirique met en relation la distance entre la surface des trous et le centre de la quantité d'explosif. La mesure de la hauteur de bourrage est faite par la détermination du coefficient de l'énergie encore appelé SDB (Scale depth of burial). Si SDB (profondeur d'enfouissement de la charge explosive rapportée au diamètre du trou de mine) est compris entre 0.9 et 1.4, alors la hauteur de bourrage est optimale.

$$SDB = \frac{St + (0.5 * L)}{Ql(0.5 * L)^{0,333}}$$

Équation 11

- SDB : coefficient de confinement de l'énergie (m/kg)
- St : Stemming (hauteur de bourrage)
- Ql : Charge linéaire.

Dans la conception des tirs de mine, le niveau de confinement de la charge explosive constitue un paramètre déterminant pour le contrôle des projections et l'efficacité énergétique du tir. La littérature technique internationale converge vers trois (03) seuils de référence exprimés en nombre de diamètres de forage recouvrant la colonne de charge : 6D, 8D et 10D. Ces valeurs ne sont pas arbitraires ; elles résultent d'un consensus établi à partir de milliers d'essais en mines industrielles et en carrières. Selon **Konya & Walter (1990)** et **l'ISEE Blasters' Handbook (21st edition, 2019)**, 6D représente le seuil minimal de confinement acceptable, le niveau 8D correspond au confinement "standard" généralement utilisé dans les mines à ciel ouvert, assurant un équilibre optimal entre fragmentation, pression dans la colonne et stabilité du front. Enfin, 10D est considéré comme un niveau de confinement élevé, recommandé lorsque le contexte géomécanique ou environnemental impose un contrôle renforcé des projections, comme le confirment **Persson, Holmberg & Lee (2004)** et **Langefors & Kihlström (1978)**. Ces trois classes : faible (6D), normal (8D)

et fort (10D) sont aujourd'hui intégrées dans la plupart des approches empiriques de calcul, notamment pour le coefficient de confinement de l'énergie et pour la prévision de la distance maximale de projection, car elles constituent des repères mécaniques robustes permettant de classer le comportement du massif durant la détonation. Leur utilisation assure ainsi une analyse reproductible, comparable et conforme aux bonnes pratiques internationales en ingénierie des mines. La figure 13 représente un trou dans de mine chargée à l'explosif.

Les lois empiriques permettent de déterminer la valeur de la hauteur de bourrage optimale pouvant favoriser un bon confinement de l'énergie, une fragmentation optimale de la roche et une projection réduite des pierres issues du tirs. Elle stipule que la hauteur de bourrage doit être comprise entre vingt fois le diamètre du trou et trente fois le diamètre du trou (Chiapetta1983), donc elle est au minimum égale à 20 fois le diamètre et au maximum à 30 fois le diamètre.

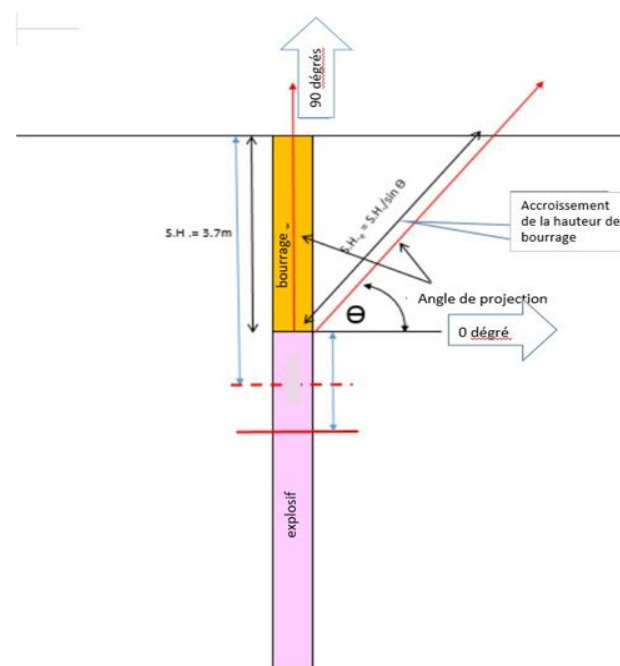


Figure 13: Diagramme de confinement de l'énergie

La formule permettant de déterminer la distance maximale de projection des pierres à travers notre modèle mise en œuvre par **Lundborg (1979)** est la suivante dans l'équation 12 :

$$L_m = 11 \times SD^{-2,667} \times \left(\frac{D}{SF} \right)^{0,667}$$

Équation 12



- L_m : la portée maximale en mètre ;
- 11 : une constante empirique ;
- SD : le coefficient de confinement ;
- D : le diamètre du trou ;
- SF : le facteur de forme de la roche.

Les paramètres L_m et V_o sont des paramètres très importants qui nous permettront de prendre des décisions sur la représentation graphique des données de projection. A la mine d'or d'Ity, les hauteurs de bancs généralement dynamitées sont de 5 m et 10 m.

Il faut aussi noter que le facteur forme (SF) qui a des valeurs de 1,1 à 1,3 est un paramètre représentatif dans la détermination de la distance de projection des fragments.

En couplant les différentes équations de Chernigovskii (qui calculent les trajectoires des particules en fonction de la vitesse de lancement), les équations de Lundborg (qui estiment la vitesse de lancement de la particule) avec les équations de profondeur d'enterrement décrite par Chiappetta il devient possible d'estimer les trajectoires des particules à travers une simulation.

II.2.4.6 Évaluation des distances de retombée des fragments rocheux

Cette estimation se fera en 02 phases :

- ❖ Élaboration des sections des différents niveaux des fosses ;
- ❖ Traitement des données.

II.2.4.6.1 Élaboration des sections des différents niveaux des fosses

Cette étape consiste à réaliser une section du modèle de conception des différentes fosses d'exploitations, de façon perpendiculaire au mur de la fosse, en utilisant le logiciel Surpac. Une fois la section générée, les coordonnées situés au niveau de la crête et du pied de chaque banc d'exploitation sont extraites. Ces données sont ensuite exportées vers un fichier Excel spécifiquement conçu pour cette opération, afin de préparer la phase suivante de l'étude.



Les étapes pour l'élaboration de ces coupes de définissent comme suit. A travers le logiciel Surpac :

- Importer depuis le navigateur le fichier dtm de la fosse d'exploitation pour le déposer sur l'interface de travail ;
- Définir les sections selon les directions considérées ;
- Afficher les coordonnées des niveaux et les exportées sur Excel.

II.2.4.6.2 Traitement des données

Le traitement des données se fait selon plusieurs étapes qui sont entre autres :

- ❖ la transformation des données ;
- ❖ la saisie des paramètres d'entrées ;
- ❖ La lecture des distances.

❖ Transformation des Coordonnées

Après avoir élaboré les sections à partir des différents DTM des fosses permettant d'avoir les coordonnées de la crête et du toe, il s'agira maintenant de transformer les données et ensuite pouvoir lire les distances qui en résultent.

Les coordonnées X et Z exportées de Surpac, sont manipulées de sorte à pouvoir représenter fidèlement la section de la fosse dans un plan. Il s'agit ici de se mettre dans deux (02) configurations de tir à l'explosif, une première configuration où le tir se déroule au pied du gradin (Mur), qui peut être par exemple un tir de pré découpage. La seconde configuration sera un tir se déroulant au centre de la fosse, qui est par exemple un tir de production L'idée est de savoir dans chacune de ces deux (02) configurations de tir, la distance maximum de projection de pierres en fonction des paramètres d'entrée.

❖ La saisie des paramètres d'entrées

Pour mettre en évidence les distances de projection des pierres, il faudra entrer les paramètres qui influence la portée de ces fragments qui sont entre autres :



- la hauteur de bourrage préalablement définie
- le diamètre du trou.
- la densité de la roche ;
- la densité de l'explosif ;
- les coordonnées des points.

❖ Lectures des distances

Une fois les coordonnées transformées et les paramètres d'entrée renseignés, la représentation graphique de la section a lieu. Dès lors, la lecture des distances de projection peut se faire. En fonction des caractéristiques du matériau et de l'angle de projection, plusieurs trajectoires de projection sont matérialisées. La distance de projection est celle générée par la courbe (trajectoire) de projection qui arrive le plus loin possible au regard du niveau où se déroule le tir. Dans cette étude, la détermination de la distance maximale de projection repose sur une approche combinant des outils empiriques et des critères de sécurité adaptés au contexte opérationnel de la mine d'Ity. Les trajectoires de fragments sont générées à partir des paramètres géotechniques et des conditions de tir, puis analysées en tenant compte d'un intervalle de confiance de 95 %. Cet intervalle permet de couvrir la quasi-totalité des variations possibles des paramètres influençant la projection (densité des roches, qualité du bourrage, énergie explosive, angle de projection, etc.), garantissant que les distances retenues incluent les situations les plus probables. Afin d'assurer une protection optimale du personnel, un facteur de sécurité de 200 % est appliqué à la distance maximale obtenue. Ce coefficient, recommandé dans plusieurs guides de sécurité du dynamitage, vise à multiplier par deux la zone d'exclusion pour prendre en compte les incertitudes liées au terrain, aux pratiques de chargement et aux irrégularités géologiques. Toutefois, même avec ce facteur, une part résiduelle d'incertitude subsiste, correspondant aux 5 % de cas extrêmes non couverts par l'intervalle statistique. Pour intégrer cette variabilité supplémentaire, une marge fixe de 100 mètres est ajoutée comme tampon de sécurité.



II.2.4.6.3 Détermination des zones exclusion

La zone d'exclusion est fonction de la distance maximale de projection et d'un facteur de sécurité défini selon les normes établis. Ce facteur de sécurité est établi afin de minimiser les risques de calcul et accorder une marge de sécurité. La zone d'exclusion est déterminée à travers la formule ci-dessous de l'équation 13.

$$\text{Zone d'exclusion engins(m)} = F_s \times D_{\max}$$

Équation 13

- F_s : facteur de sécurité
- D_{\max} : Distance maximale de projection(m)

Le facteur de sécurité F_s considéré est de 1.3.

Après avoir présenté de manière détaillée le matériel utilisé ainsi que la méthodologie adoptée, il convient à présent d'aborder les résultats obtenus, suivis de leur analyse et de leur interprétation.



CHAPITRE III : RESULTATS, ANALYSES ET INTERPRETATIONS

III.1. ETUDE DE L'EXISTANT

III.1.1 Présentation dispositif actuel

Après conception de la zone impactée sur Surpac, le résultat se décrit comme le suivant dans la figure 14 en affichant par la suite l'image TIF mettant en évidence les différentes aires du site.

La figure 14 met aussi en évidence les lieux de stationnement des équipements, le parcours que doit effectuer le contrôleur de blast, le positionnement des blasts Guard et les cercles dédiés aux zones d'exclusions. Comme sur la carte, la signature est obligatoire pour toutes les parties prenantes afin de connaître les endroits à évacuer.

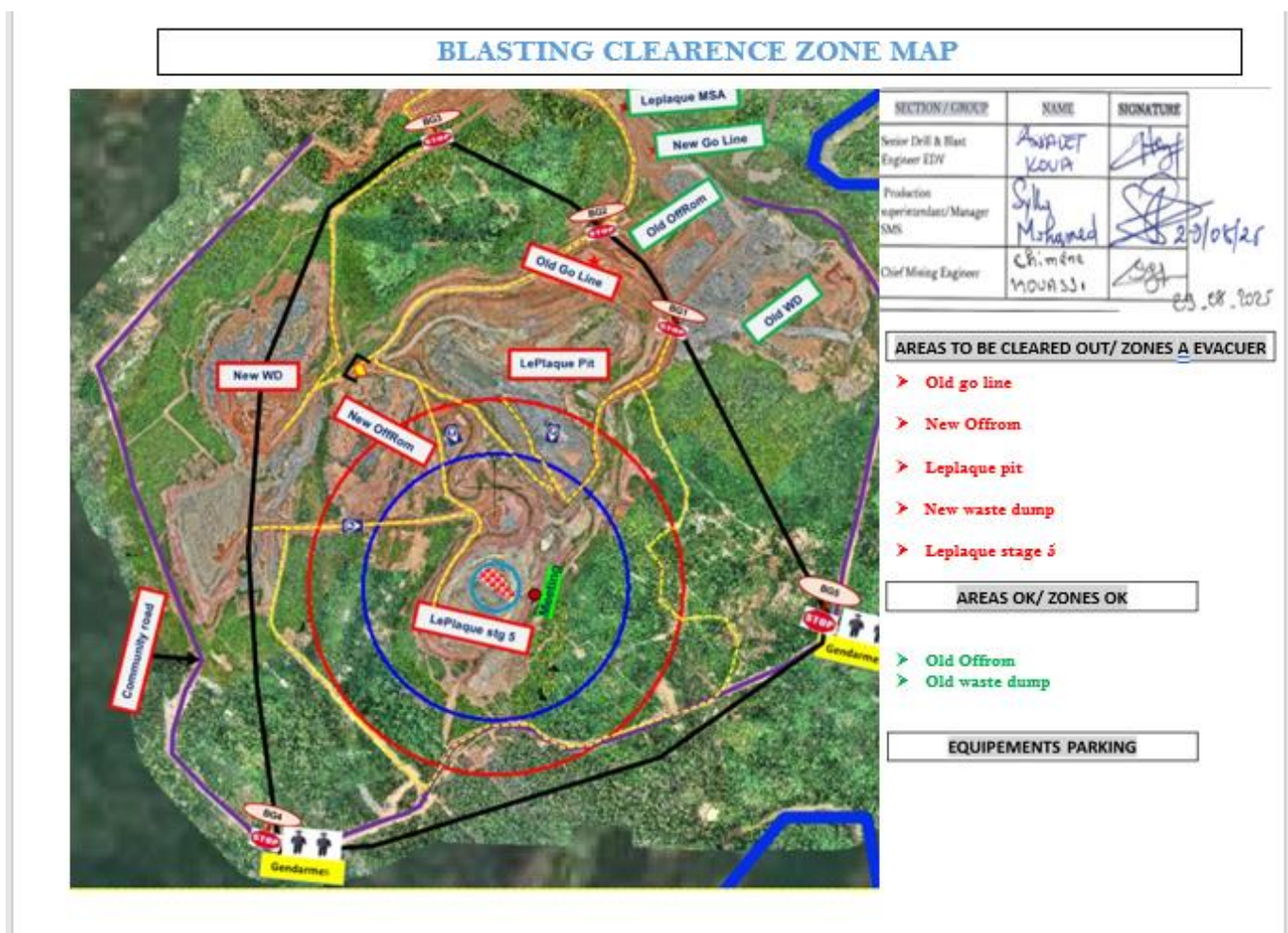


Figure 14: Clearance Map



III.1.2 Paramètres de tir

Le tableau I nous montre les paramètres de tirs couramment utilisés pour le dynamitage à la mine d'or d'Ity.

Les paramètres sont définis en fonction de certaines conditions pouvant être liés à la structurale de la zone, ou en fonction de ce qui est recherché comme résultat final.

Tableau I: Paramètres de tir

	Transition		Roche saine	
Densité	2.5		2.8	
Diamètres mm	127	140	127	140
Hauteur de banc (m)	5		5	
Hauteur de bourrage(m)	2.8	2.8	2.3	2.3
Hauteur de banc (m)	10		10	
Hauteur de bourrage (m)	3.3	3.3	3	3

III.1.3 Critique de l'existant

Les zones d'exclusion ne sont pas définies en considérant les paramètres de tirs ainsi que les paramètres de terrain, tels que la profondeur de la fosse, la position du tir dans la fosse.

III.2 INFLUENCE DES PARAMETRES DE TIR SUR LA PROJECTION DES PARTICULES

III.2.1 le diamètre du trou

A ce niveau, il faut dire que, plus le diamètre du trou est grand, plus la quantité du produit augmente, favorisant une probable augmentation de la projection des fragments (figure 15). Un trou de plus grand diamètre va aussi générer des ondes de chocs plus puissantes. Un diamètre de trou grand favorise une bonne fragmentation. Plus la fragmentation est bonne, moins les

risques de projection sur de grandes distances sont. On peut retenir que plus le diamètre est petit, moins d'énergie, projections plus limitées.

Pour un grand diamètre, plus d'énergie, donc portée maximale potentiellement plus grande

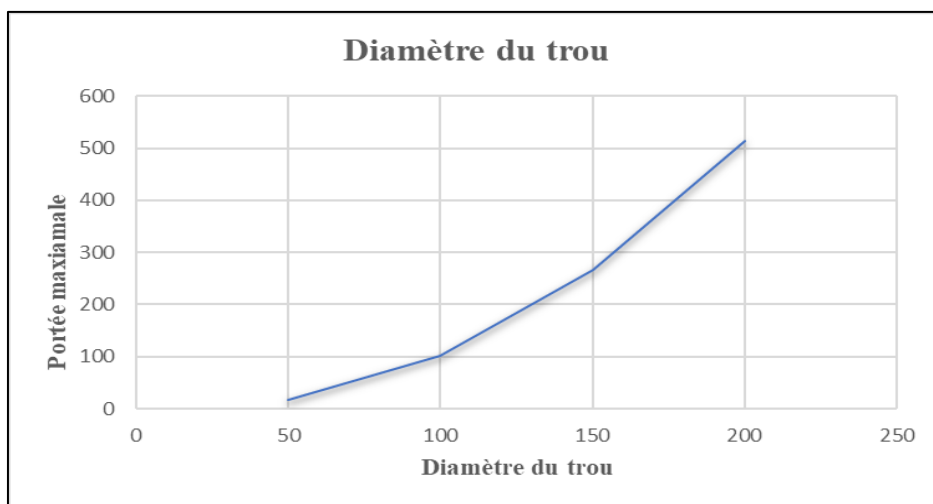


Figure 15: Influence du diamètre du trou

III.2.2 Le facteur forme

La figure 16 montre que le facteur forme influence la distance de projection des fragments. Plus le facteur forme augmente, la portée du tir diminue.

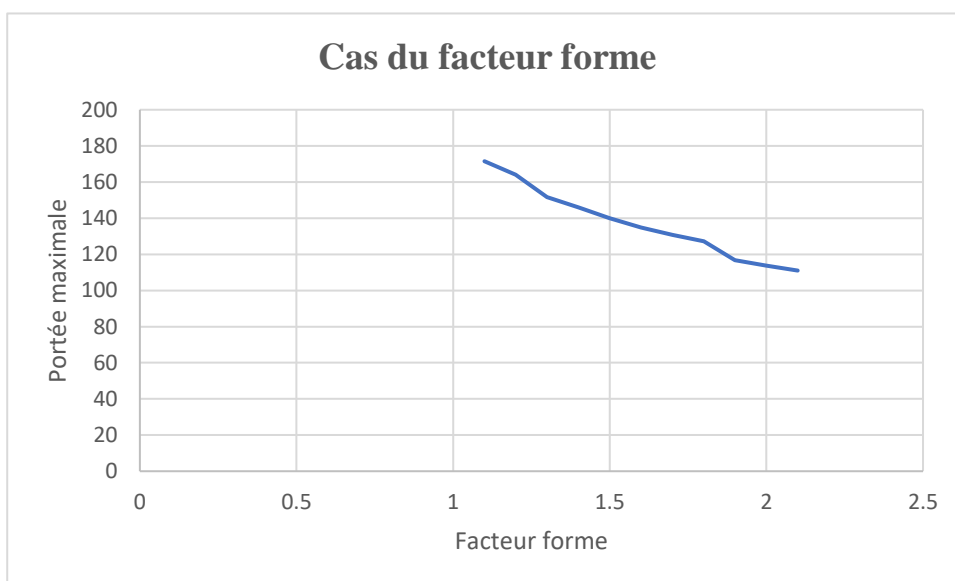


Figure 16: Influence du facteur forme sur la portée

III.2.3 La hauteur de bourrage

Le bourrage confine les gaz de détonations au sommet du trou, plus le confinement est bon plus l'énergie des gaz est utilisée pour fragmenter et déplacer la roche. Ce graphe (figure 17) montre que plus la hauteur de bourrage est faible, plus la projection des fragments s'étend sur une longue distance. Si le bourrage est insuffisant, les gaz peuvent s'échapper par le haut, ce que l'on appelle un Blow out (fuite d'énergie). Cet écoulement de gaz violent crée des jets et des projectiles de grandes vitesses. Ce qui induit une portée maximale plus importante.

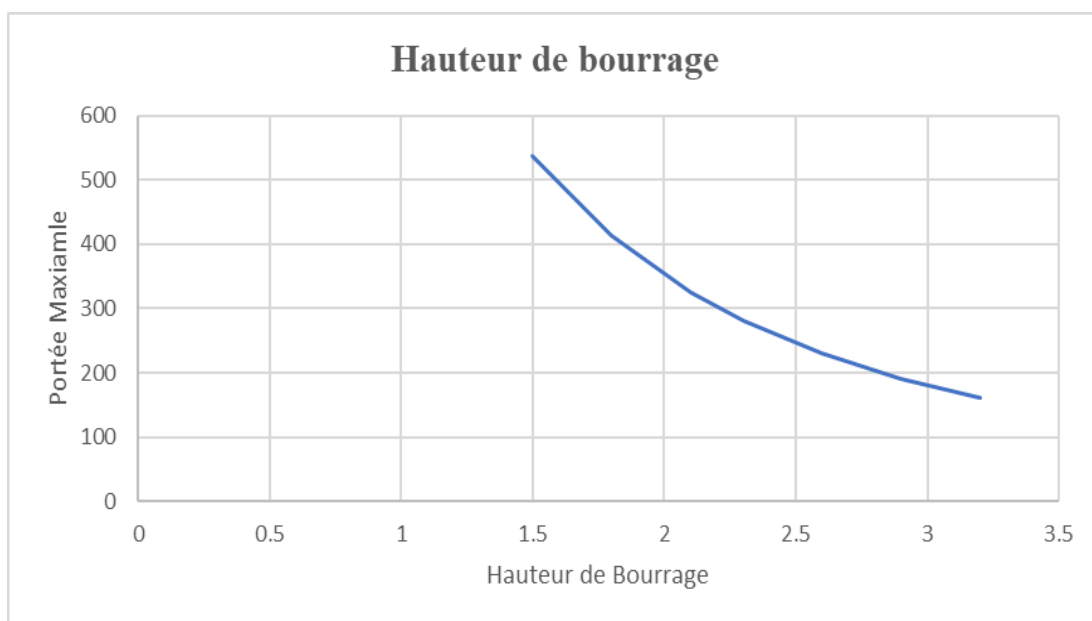
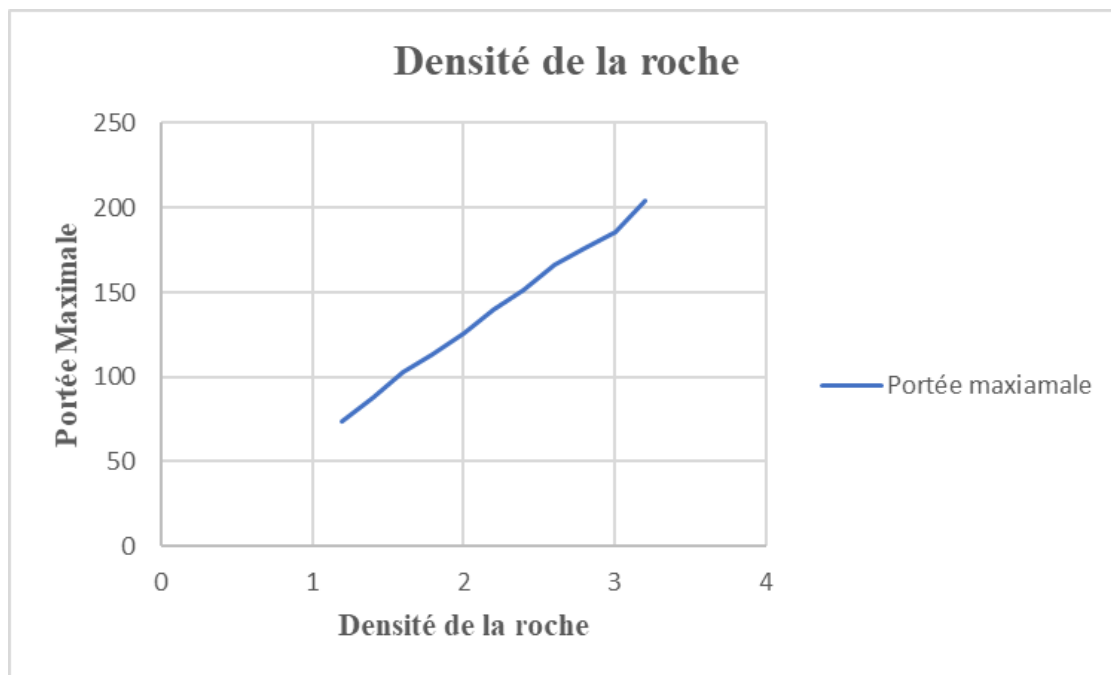


Figure 17: Influence de la hauteur de bourrage sur la portée

III.2.4 La densité de la roche

La densité de la roche a un impact significatif sur la portée des fragments de pierres. Plus la roche est dense, plus le projectile a tendance à se propulser plus loin, plus la roche est moins dense, le projectile est propulsé plus près comme le présente la figure 18.



III.2.5 La densité de l'explosif

La densité joue un rôle significatif dans la projection des pierres, une densité de l'explosif plus grande augmente la portée potentielle des fragments (figure 19).

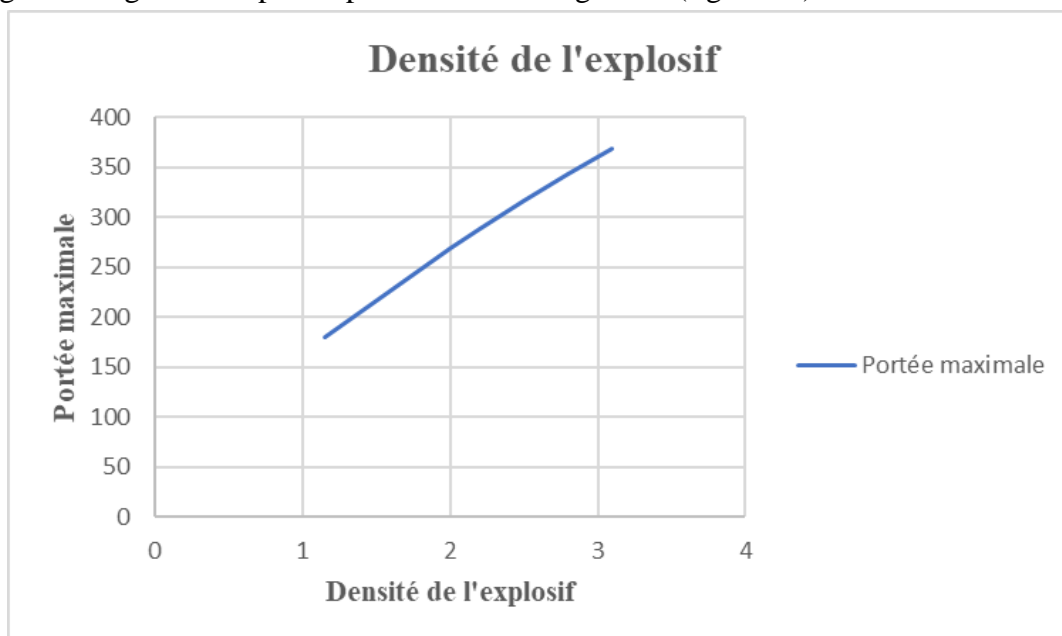


Figure 19: Influence de la densité de l'explosif



III.3 DETERMINATION DU MODELE DE PREDICTION DES FRAGMENTS

III.3.1 Vitesse de projection

La vitesse de projection étant fonction du facteur forme, de la taille des particules et de la densité de la roche. Le tableau II, montre les variantes de la vitesse en fonction de ces paramètres. Nous pouvons constater que la forme des fragments influence leur vitesse de déplacement. Plus le fragment est de grande taille, plus la vitesse est grande. L'objectif fixé pour la taille des fragments est de 350 mm afin de faciliter le concassage à l'usine de traitement vu que la maille du concasseur ne peut recevoir que (02) fragments de tailles inférieur ou égal à 350 mm.

Tableau II: Variation de la vitesse en fonction du facteur forme

Facteur formes	Tailles des particules (mm)						
	10	20	30	40	50	60	70
1.1	47.97902939	67.85259408	83.1021166	95.95805879	107.2843712	117.5241404	126.94058
1.2	45.93642335	64.9639129	79.5642192	91.87284669	102.7169652	112.5207978	121.53635
1.3	44.13428798	62.41530862	76.4428291	88.26857595	98.68726805	108.1064857	116.76835
Variation de la vitesse en fonction du facteur forme et la taille des particules							

III.3.2 Détermination de l'enfouissement du bourrage

Nous avons pu obtenir les résultats suivants concernant le coefficient de confinement de l'énergie à travers la loi de scale depth of buriale. Ces valeurs sont fonctions de la hauteur de bourrage et du diamètre du trou. Elle nous permet de juger la qualité de la hauteur de bourrage. On constate dans le tableau II que les valeurs du coefficient du confinement de l'énergie sont comprises entre 0.9 et 1.4, alors les hauteurs de bourrages sont optimales.



Tableau IIII : Coefficient d'énergie en fonction de la hauteur de bourrage

	Diamètre (mm)	
	127	140
hauteur de bourrage (m)	Coefficient de confinement (m/kg)	
2.8	1.24	1.042
2.3	0.966	0.899
3	1.187	1.099

Pour une hauteur de bourrage de 2,8 m et un diamètre de 127 mm, le coefficient de confinement de l'énergie donne une valeur de 1,24. Cette valeur du coefficient de confinement de l'énergie est dans l'intervalle 0.9 et 1,4. Par conséquent, la hauteur de bourrage est bonne.

III.3.3 Distance maximale de projection

III.3.3.1 Présentation du modèle obtenu

A partir des formules de Chernigovskii, celui de Chiappetta et de Lundborg ce modèle ci-dessous a été mis en place pour l'estimation de la distance de projection. Dans la conception du modèle, nous nous sommes servis de trois feuilles Excel nommée comme suit :

Calcul, Pit Sections, Resultat

❖ Calcul

Cette feuille (figure 20) met en évidence les paramètres d'entrées qui sont d'ordres contrôlables, c'est-à-dire modifiables selon nos attentes. Elle contient les paramètres tels que : le diamètre du trou, la hauteur de bourrage, la densité de la roche et la densité de l'explosif. Faire varier ces paramètres nous permet d'avoir les trajectoires des particules et la distance maximale de projection des particules.

❖ Paramètres d'entrées du modèle



- **Diamètre du trou de mine (Blast Hole Diameter)**

Le diamètre du trou (127 mm ou 140 mm selon les cas) conditionne la charge linéaire d'explosif et influence la vitesse initiale des fragments. Un diamètre plus large entraîne une énergie explosive plus importante et, par conséquent, une distance de projection plus grande.

- **Hauteur du bourrage (Stemming Length)**

Le bourrage, exprimé en mètres, permet de confiner l'énergie générée par l'explosif. Un bourrage insuffisant augmente considérablement le risque de projections. Le modèle accepte une variation d'un écart-type pour représenter les variations opérationnelles (2,3 m – 3,3 m).

- **Densité de l'explosif (Explosive Density)**

La densité (1,15 g/cc) représente la masse volumique du produit explosif. Une densité élevée accroît la puissance de l'explosion, augmentant ainsi la vitesse initiale des blocs.

- **Charge linéaire explosive (Explosive Load, kg/m)**

Calculée à partir du diamètre et de la densité de l'explosif (environ 14,57 kg/m), elle représente la quantité d'explosif par mètre de trou. Elle conditionne directement l'énergie de fragmentation.

- **Densité de la roche (Rock Density)**

La densité du massif (2,4 g/cc pour la roche transitionnelle) influence la résistance à l'explosion et le comportement des blocs. Une roche plus dense produit généralement des fragments plus lourds mais moins portés.

- **Scaled Depth of Burial (SDB)**

Le SDB représente le niveau de confinement de la charge explosive, exprimé par le rapport entre la profondeur d'enfouissement de la charge et le diamètre du trou. Il s'agit d'un paramètre déterminant pour simuler différentes conditions d'énergie lors du tir.



- Utilisation dans le modèle

Trois valeurs sont simulées :

- **6 SDB** : scénario énergétique défavorable forte projection ;
- **8 SDB** : scénario moyen ;
- **10 SDB** : scénario favorable projection plus courte

Ces trois niveaux permettent d'encadrer les cas réalistes de terrain.

• Calcul de la distance maximale de projection (Range Max)

Le modèle calcule la distance maximale de projection en combinant :

- le SDB,
- la forme du fragment (Shape Factor 1.1 à 1.3),
- les paramètres géologiques,
- la vitesse initiale des fragments.

La portée maximale affichée dans le tableau indique la distance atteinte par la trajectoire la plus longue, selon un intervalle de confiance de 95 %.

• Taille des fragments (Particle Size)

Le modèle estime la taille moyenne des fragments projetés en fonction du SDB. Ceci permet d'évaluer :

- la masse du fragment ;
- ses capacités aérodynamiques ;
- son angle de lancement.

• Vitesse initiale (Initial Velocity V_0)

La vitesse initiale est calculée en fonction du SDB et des caractéristiques du tir. Elle varie entre 82 et 91 m/s, ce qui est cohérent avec les valeurs documentées dans les ouvrages de référence (Holmberg & Persson, 1976 ; Mohamad, 2013).

La vitesse initiale est le principal déterminant de la portée d'un fragment.

- **Gestion de la variabilité opérationnelle**

- Intervalle de confiance 95 %

L'intervalle utilisée couvre 95 % des cas statistiquement probable, il prend en compte les incertitudes géologiques, les variations de chargement, les défauts de bourrage ou les hétérogénéités du massif.

Blast Hole Diameter	mm	127	<i>input</i>							Accept 1x Standard Deviation in Stemming length
Stemming Length	m	2.8	<i>input</i>							
Explosive Density (Average in hole)	g/cc	1.15	<i>input</i>							Lower limit 2.3 m
Explosive Load - kg/m	kg/m	14.57								Upper Limit 3.3 m
Rock Density	g/cc	2.4	<i>input</i>							+/- Range 0.46 m
<i>95% Confidence interval</i>										

Scaled depth of burial (SDB): 78										
		Design SDB			Minimum Acceptable					
Number of Hole Diameters:										
6		1.426			1.219					
8		1.347			1.159					
10		1.299			1.124					

Range Max (m)		Design SDB			Minimum SDB			Shape Factor Variance to Design		
	Shape Factor	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2	1.3
SDB(6)	m	121	114	108	170	161	152	141%	141%	141%
SDB(8)	m	137	129	122	190	179	170	139%	139%	139%
SDB(10)	m	148	140	133	203	191	181	137%	137%	137%

Particle Size (mm) - Range Max		Design SDB			Minimum SDB					
	Shape Factor	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2	1.3			
SDB(6)	mm	34	35	36	48	49	51			
SDB(8)	mm	39	40	41	53	55	57			
SDB(10)	mm	42	43	44	57	59	60			

Initial Velocity - Vo (m/s) - Range Ma		Design SDB			Minimum SDB					
	Shape Factor	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2	1.3			
SDB(6)	m/s	82	80	78	97	95	92			
SDB(8)	m/s	87	85	83	103	100	97			
SDB(10)	m/s	91	88	86	106	103	100			

Figure 20: Feuille de calcul du modèle

La figure 21 représente la simulation détaillée de la trajectoire des fragments projetés pour différents angles de lancement allant de 0° à 80° (par rapport à la verticale). Le modèle calcule les positions successives x (portée horizontale) et y (altitude) à différents temps, à partir des paramètres dynamiques du fragment tels que la vitesse de projection (V_0) et le coefficient de traînée aérodynamique.

Le coefficient de traînée aérodynamique (noté **Bd**) est un paramètre physique qui décrit la résistance que l'air oppose au mouvement d'un fragment lorsqu'il est projeté lors d'un tir de mines.

Particle Motion Data (copy and paste to results page)																					
Initial Position																					
x																					
y																					
Vo	78		Launch Angle (Off vertical)																		
Bd	0.015		0		10		20		30		40		50		60		70		80		
Time	Z	Y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	
	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0.5	31	1.2	0	29	5	29	10	28	15	25	20	22	23	18	26	14	29	9	30	4
	1	51	4.8	0	47	9	46	18	44	26	40	33	35	39	28	45	21	48	13	51	4
	1.5	67	10.5	0	57	12	56	23	53	34	48	43	41	52	33	58	23	63	13	66	1
	2	80	18.0	0	62	14	61	27	57	40	51	52	43	61	34	69	22	75	9	79	-4
	2.5	91	26.9	0	64	16	63	31	59	45	52	58	43	70	32	79	19	85	4	90	-11
	3	100	36.9	0	63	17	62	34	57	50	50	64	40	77	28	87	13	94	-3	99	-19
	3.5	108	47.7	0	61	19	59	37	54	54	46	70	35	83	22	94	6	102	-11	107	-29
	4	116	59.1	0	56	20	55	40	49	58	41	74	29	88	15	100	-1	109	-20	114	-39
	4.5	122	70.9	0	51	21	49	42	44	61	35	78	23	93	8	106	-10	115	-29	120	-50
	5	128	83.1	0	45	22	43	44	37	64	28	82	15	98	-1	111	-19	120	-39	126	-61
	5.5	133	95.4	0	38	23	36	46	30	67	20	86	7	102	-10	116	-29	125	-50	131	-72
	6	138	107.9	0	31	24	29	47	22	69	12	89	-2	106	-19	120	-39	130	-61	136	-84
	6.5	143	120.5	0	23	25	21	49	14	72	4	92	-11	110	-28	124	-49	135	-71	141	-96
	7	148	133.1	0	14	26	12	50	6	74	-5	95	-20	113	-38	128	-59	139	-83	145	-107
	7.5	152	145.8	0	6	26	4	52	-3	76	-14	97	-30	116	-48	131	-70	143	-94	149	-119
	8	156	158.5	0	-3	27	-5	53	-12	78	-24	100	-39	119	-59	135	-81	146	-105	153	-131
	8.5	159	171.2	0	-12	28	-14	54	-22	80	-33	102	-49	122	-69	138	-92	150	-117	157	-144
	9	163	184.0	0	-21	28	-24	56	-31	81	-43	105	-59	125	-79	141	-103	153	-128	160	-156
	9.5	166	196.8	0	-31	29	-33	57	-41	83	-53	107	-70	127	-90	144	-114	156	-140	163	-168
	10	169	209.5	0	-40	29	-43	58	-51	85	-63	109	-80	130	-101	146	-125	159	-152	167	-180

Figure 21: Position de la particule

❖ Pit section

La zone quadrillée en rouge sur la figure 22 met en évidence les coordonnées X, Z statuant de la position du tir. Sélectionner des coordonnées X et Z dans le tableau (23) comprenant les coordonnées des sections, nous permet d'avoir la position du tir, et par conséquent, la trajectoire des particules au sein de la fosse.

Ces coordonnées X, Z sont issus de la figure 23. Sur la figure 22, on observe la coupe de la fosse dont les coordonnées ont été transformées afin de représenter fidèlement la morphologie de la fosse et permettre les simulations en fonction de la position du tir dans celle-ci.

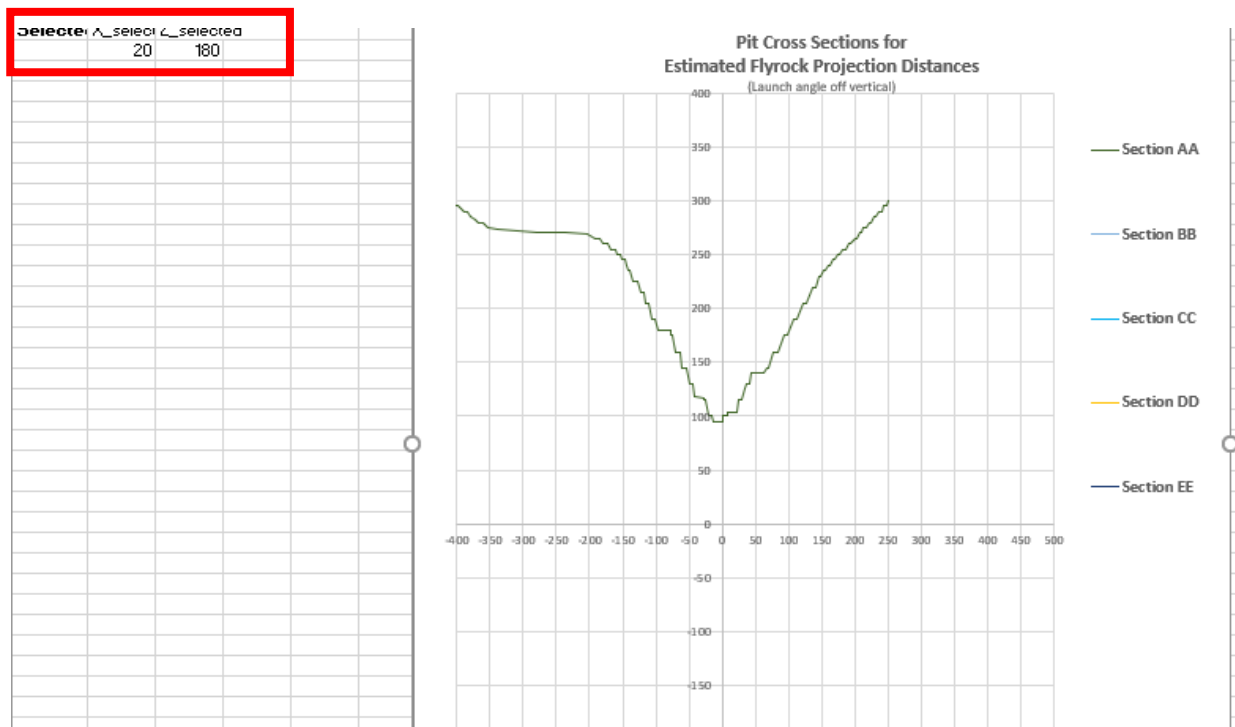


Figure 22: Section de la fosse

Les coordonnées des X, Z de chaque niveau de la fosse sont consignées dans le tableau 23. Sélectionner un couple de coordonnées et les insérer dans la zone quadrillée en rouge nous permet de voir la position du tir.

Pit Co-ordinates referenced to blast position					
AA	X	Z	BB	X	Z
	251.21	205		336.21	205
	247.49	200		332.49	200
	243.39	199.87		328.39	199.87
	239.81	195		324.81	195
	235.89	195		320.89	195
	232.23	190		317.23	190
	228.31	190		313.31	190
	224.66	185		309.66	185
	220.73	185		305.73	185
	217.08	180		302.08	180
	213.13	180		298.13	180
	209.43	175		294.43	175
	206.34	175		291.34	175
	202.67	170.04		287.67	170.04
	199.27	170		284.27	170
	193.98	165		278.98	165
	190.33	165		275.33	165
	185.61	160		270.61	160
	182.21	160		267.21	160
	177.66	155		262.66	155
	173.78	155		258.78	155
	170.15	150		255.15	150
	166.27	150		251.27	150

Figure 23: Coordonnées des points issus des sections

❖ Resultat

Elle met en évidence les résultats de la simulation comme le présente la figure 24.

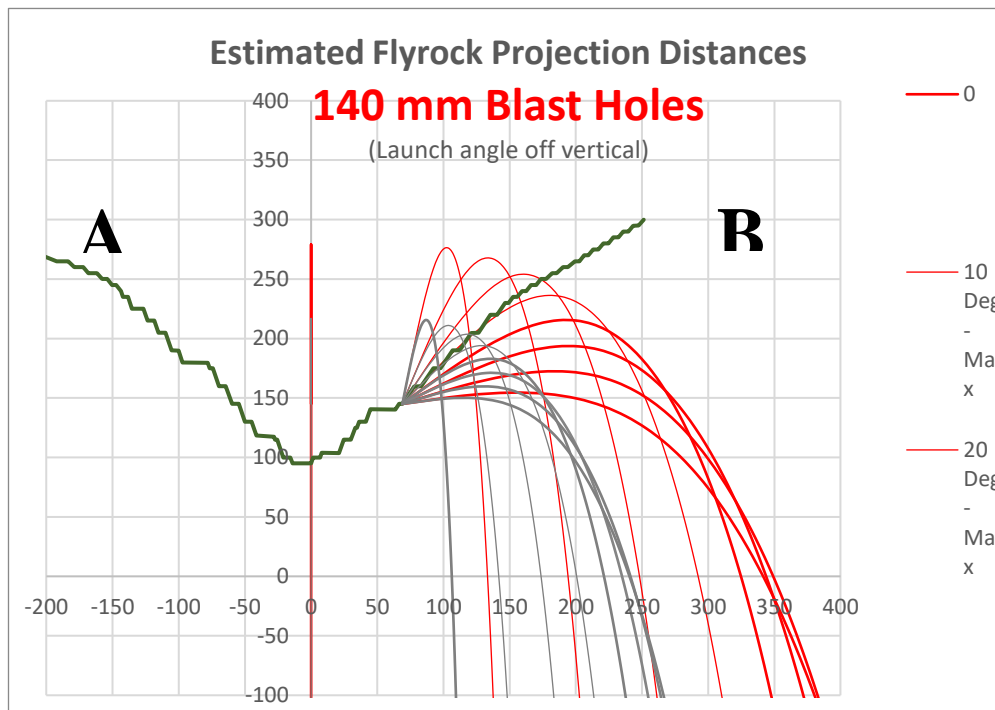


Figure 24: Exemple de résultat de simulation

III.3.4 Lecture des distances de projection

Le tableau IV montre les paramètres liés à la densité de la roche et des différents diamètres de trou utilisé à la mine d'or d'Ity pour les activités de forage.

Tableau IV: Paramètres de tir

	Wal-Bak		Leplaque	
	Roche saine	Roche transitionnelle	Roche saine	Roche transitionnelle
Densité	2.8	2.5	2.8	2.4
Diamètre	127&140		127	

Dans notre étude, les simulations se feront au niveau de la fosse de Walter

❖ Cas pratique de la fosse de Walter

Comme nous pouvons le constater dans le tableau précédent (tableau IV), les diamètres généralement utilisés pour les tirs dans nos fosses sont de 127 mm et 140 mm En fonction de la hauteur de Banc (5m ou 10m) et la lithologie de la couche, des standards relatifs à la hauteur de bourrage sont définis comme l'indique le tableau V.

Tableau V: Paramètres Walter-Bakatouo

	Walter			
Lithologie	Transition		Roche saine	
Stemming	2.8	3.3	2.3	3

- ❖ Pour chaque type de matériaux et pour chaque section, nous présenterons les distances de projections en fonction du niveau relatif Z pour juger de l'impact de la profondeur de la fosse sur la définition des zones d'exclusion. Ces simulations se feront dans toutes les directions de la fosse.

- **Section Est-Ouest**

Les figures ci-dessous montre la section effectuée dans la direction EO afin d'avoir le profil de la fosse et les coordonnées des différents niveaux de celles-ci permettant de réaliser les simulations.

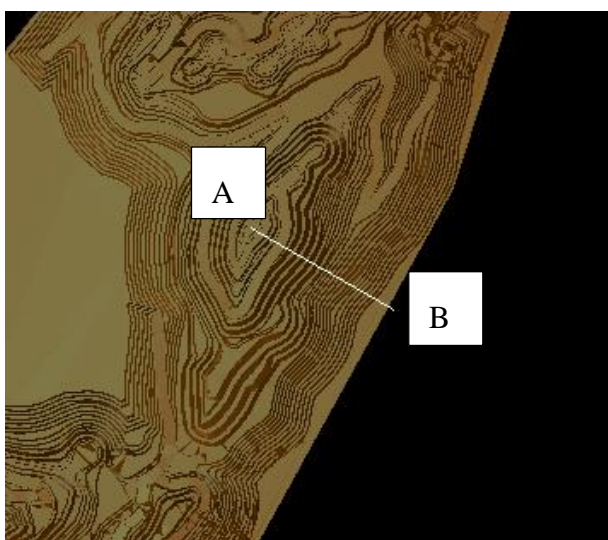


Figure 26: Direction de la section Est-Ouest

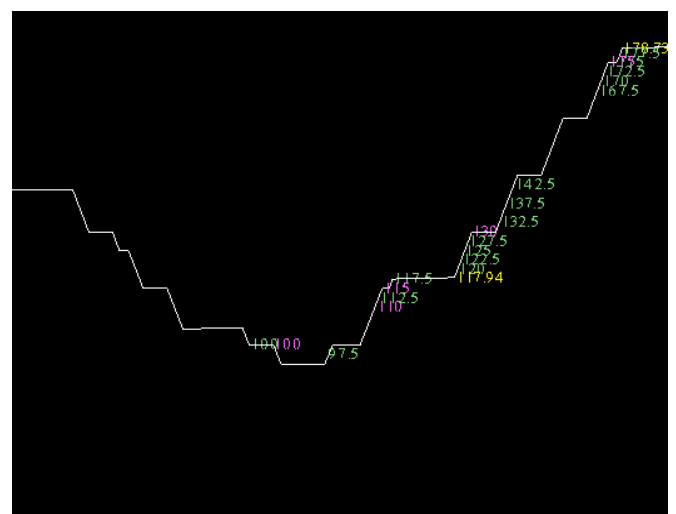


Figure 25: Coordonnées de la section

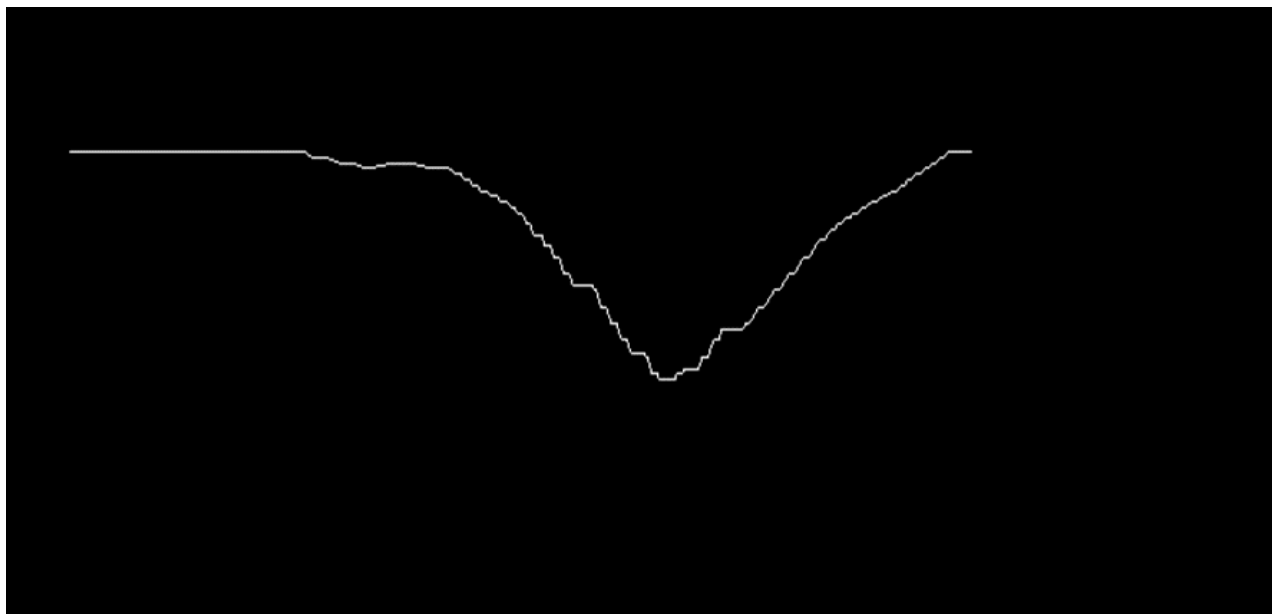


Figure 27: Section de la fosse de direction Est-Ouest

Dans cette simulation, il s'agira d'entrer les paramètres de tir afin d'apprécier la trajectoire que décrit les fragments de roche. Nous pourrions évaluer la distance effectuée par les fragments. La roche majoritaire à Walter est l'Endoskarn, qui est issue du contact entre le carbonate et la granodiorite.

❖ **Niveau 265 m, roche transitionnelle**

- **Diamètre du trou 127 mm et 2,8 m hauteur de bourrage.**

La distance maximale de projection des particules en fonction de ces paramètres est obtenue dans la figure 28. Sur cette figure, la distance maximale de chute de pierre est représentée par le trait bleu ; partant de 160 m à 348 m soit une distance de 188 m, correspondant à un angle de tir de 60°. Cette configuration a aussi permis de déterminer le type de tir, dans notre cas, nous avons affaire à un tir de trime. On constate que les fragments effectuant la plus grande distance de projection sortent de la fosse, ainsi il serait nécessaire de déplacer les engins de la zone de tir.

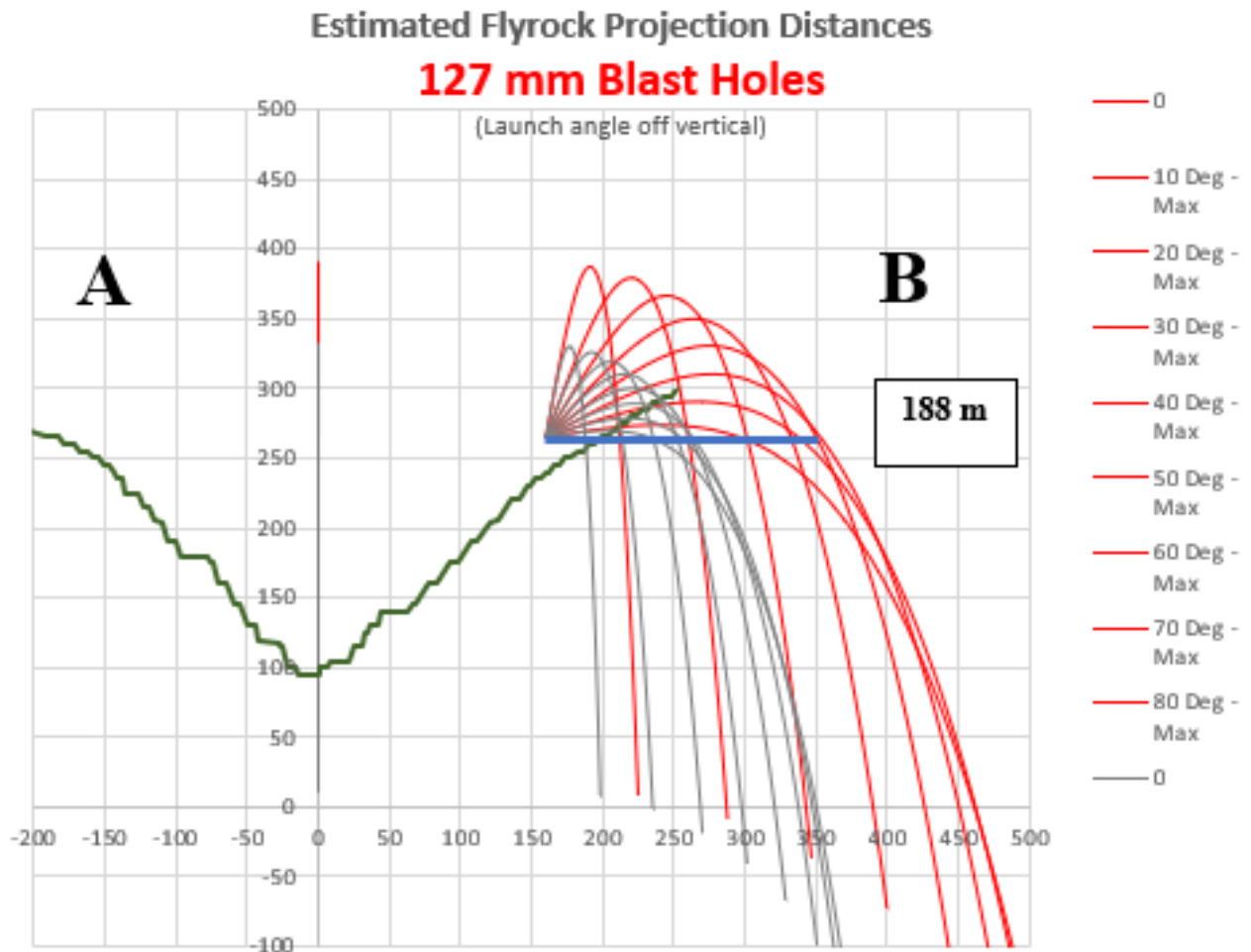


Figure 28 : Section Est-Ouest roche transitionnelle au niveau 265 m

❖ **Roche saine**

- **Diamètre 140 mm et hauteur de bourrage 3 m**

Pour une hauteur de bourrage de 3 m et un diamètre de trou de 140 mm, la figure 29 nous présente la distance maximale de projection. Avec ces paramètres, on constate que la distance maximale de projection de pierre est de 240 m (160-400), les fragments de roche parcourant cette distance sortent de la fosse. Les engins et le personnel doivent évacuer la zone.

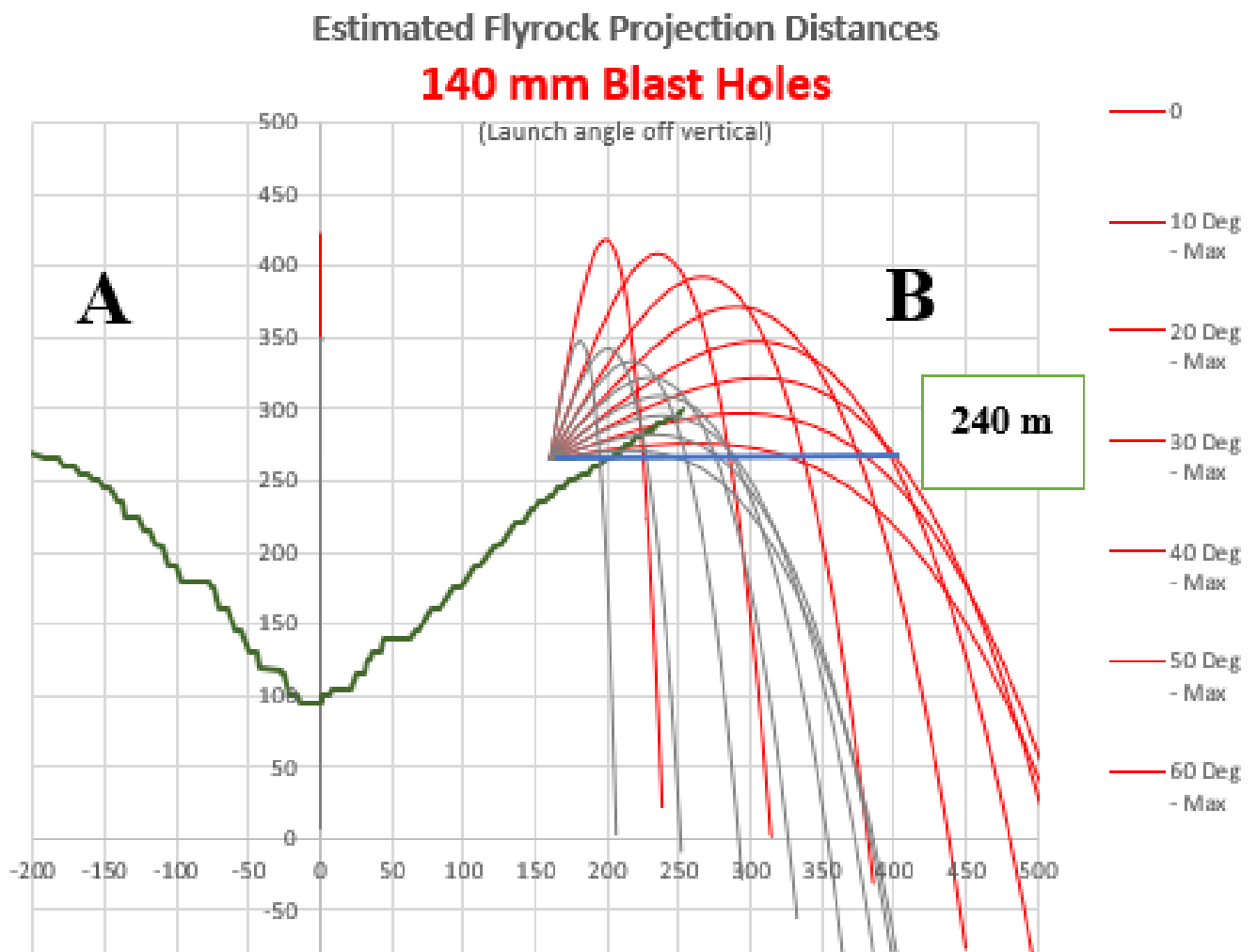


Figure 29: Section Est-Ouest roche saine niveau 265 m

❖ **Roche saine**

- **Diamètre 140 mm et une hauteur de bourrage 3 m**

La figure 30 présente la distance maximale de projection, pour une hauteur de bourrage de 3 m et un diamètre de trou de 140 mm, la distance maximale de projection est de 248 m avec un angle de projection de 60°, de plus la figure montre qu'avec cette position du tir dans la fosse, les fragments de roche ne sortent pas de la fosse. Ceci présente un avantage pour les engins de productions autour de la fosse pouvant ainsi accroître le temps de travail des engins.

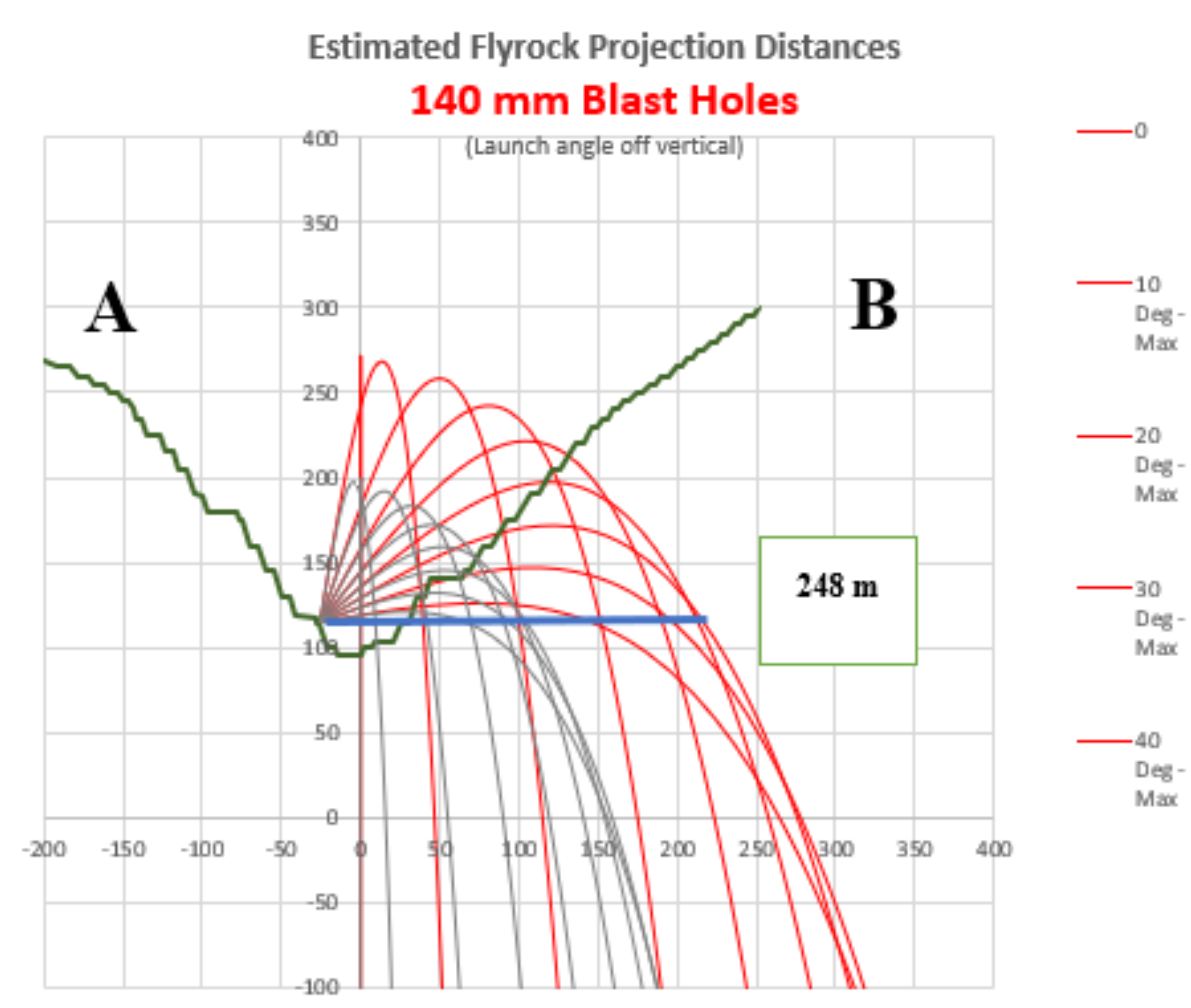


Figure 30: Section Est-Ouest Roche saine niveau 115 m

- Pour cette même roche saine avec un diamètre de 127 mm

La distance maximale de projection à partir de ces paramètres est de 193 m (figure 31), les fragments ne sortent pas de la fosse.

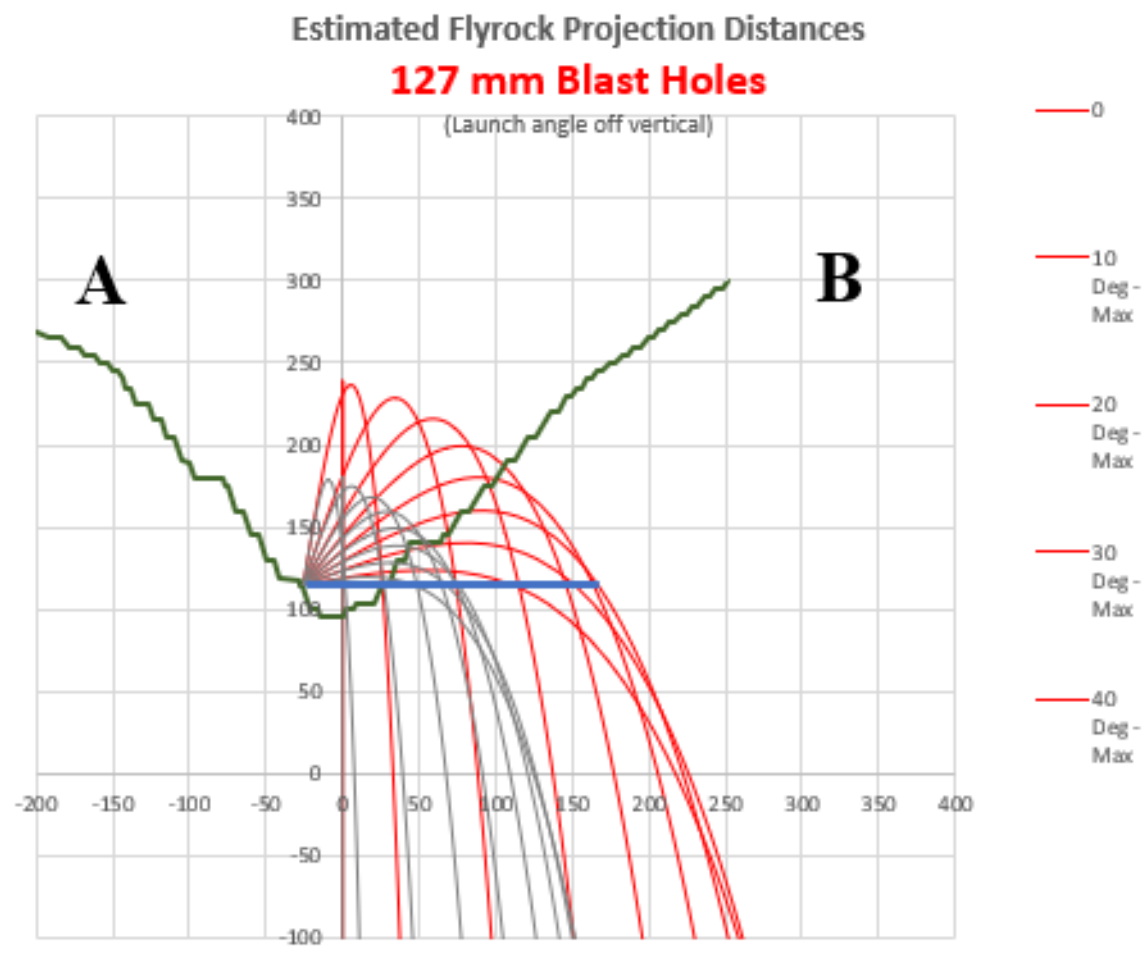


Figure 31 : Roche saine Est-Ouest niveau 115 m diamètre 127 mm

- Section Nord- Sud

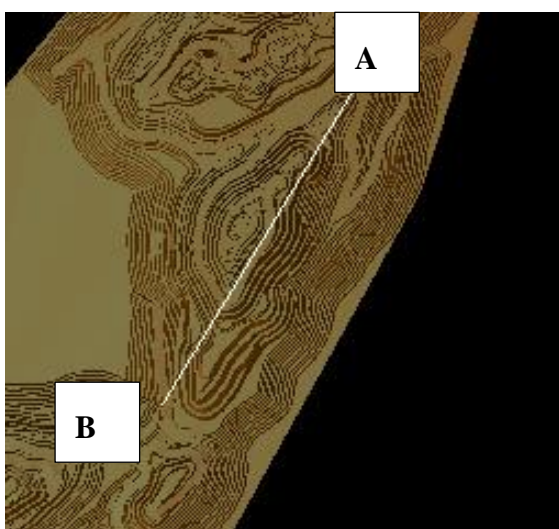


Figure 33: Section dans direction Nord-Sud

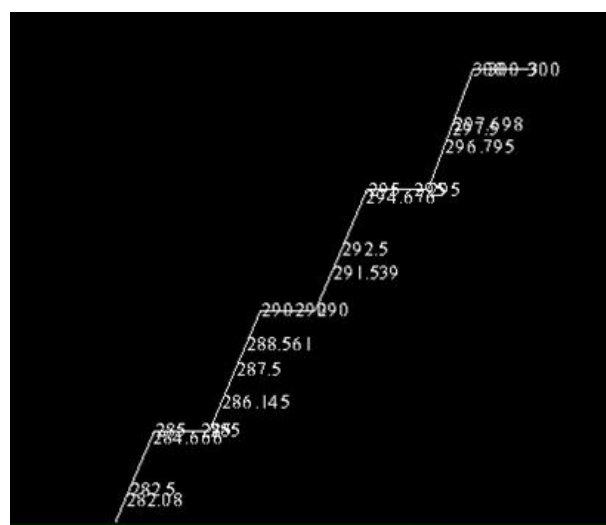


Figure 32: Coordonnées de la section North-South

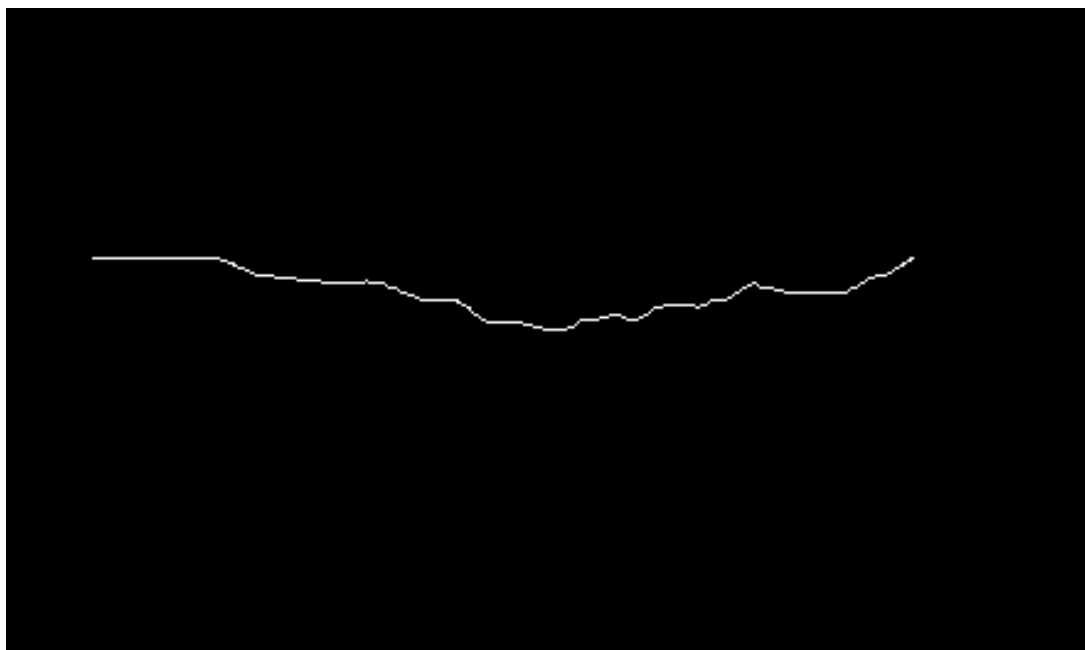


Figure 34: Section Nord -Sud

❖ **Roche saine niveau 230 m**

- **Diamètre du trou 140 mm et 3 m hauteurs de bourrage**

On constate que selon la direction N-S, la plus grande distance parcourue par les fragments est de 238 m (figure 35), ces fragments sortent de la fosse. Par conséquent, les engins ainsi que le personnel travaillant dans les fosses environnantes doivent évacuer pendant la procédure de tir.

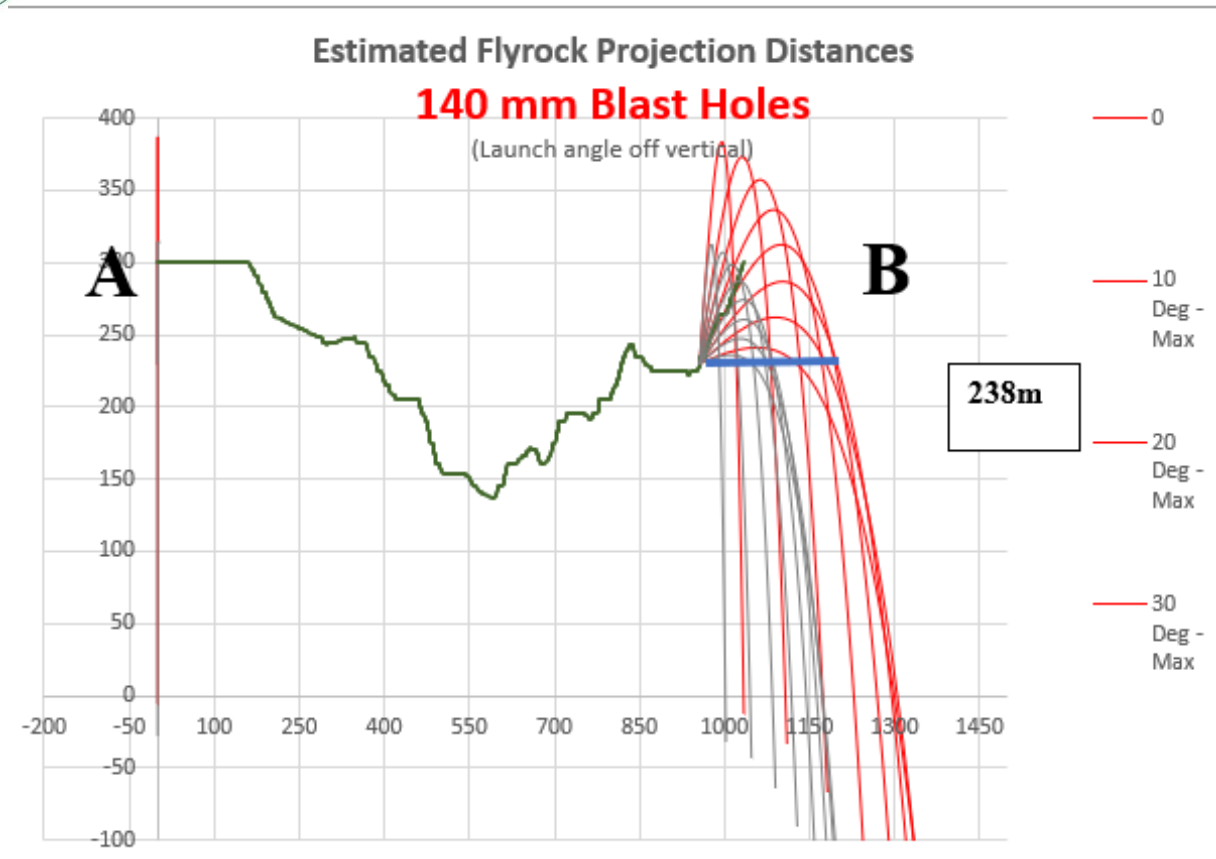


Figure 35: Section Nord-Sud roche saine niveau 230 m

❖ **Roche transitionnelle niveau 230 m**

- **Diamètre 127 mm et hauteur de bourrage 3 m**

La distance maximale de projection est celle observée sur la figure 36. La distance maximale de projection est de 164 m, on constate que les particules sortent de la fosse. Par conséquent les engins et le personnel se trouvant dans la zone de tir doivent être évacués.

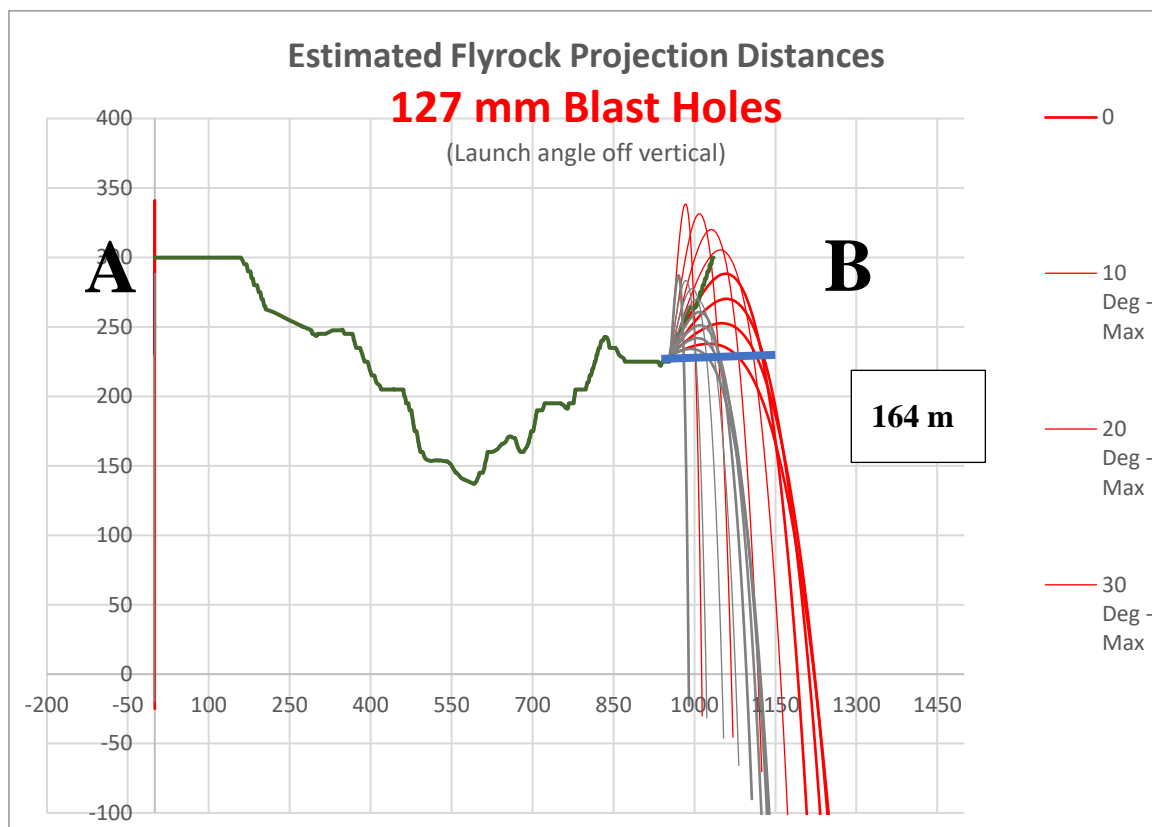


Figure 36: Section North-South roche transitionnelle niveau 230 m

- Section Nord-Est/ Sud-Ouest

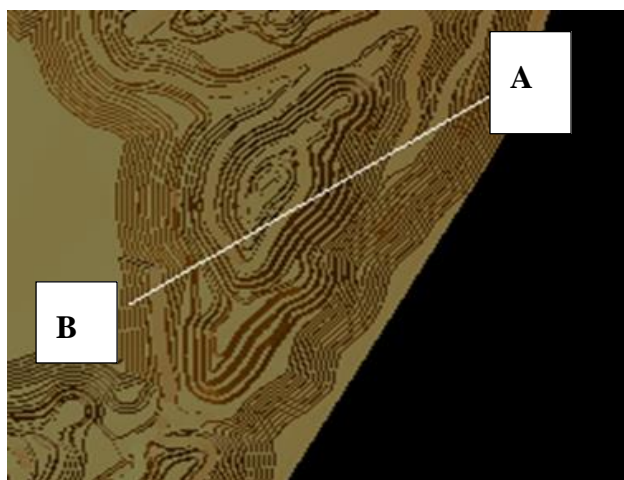


Figure 38: Section dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest

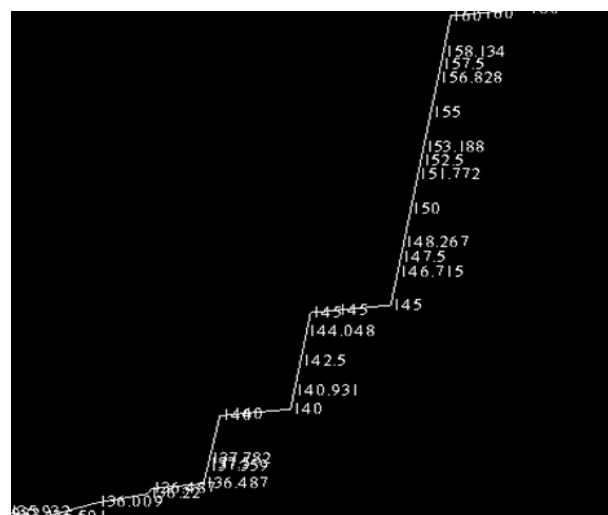


Figure 37: Coordonnées de la section

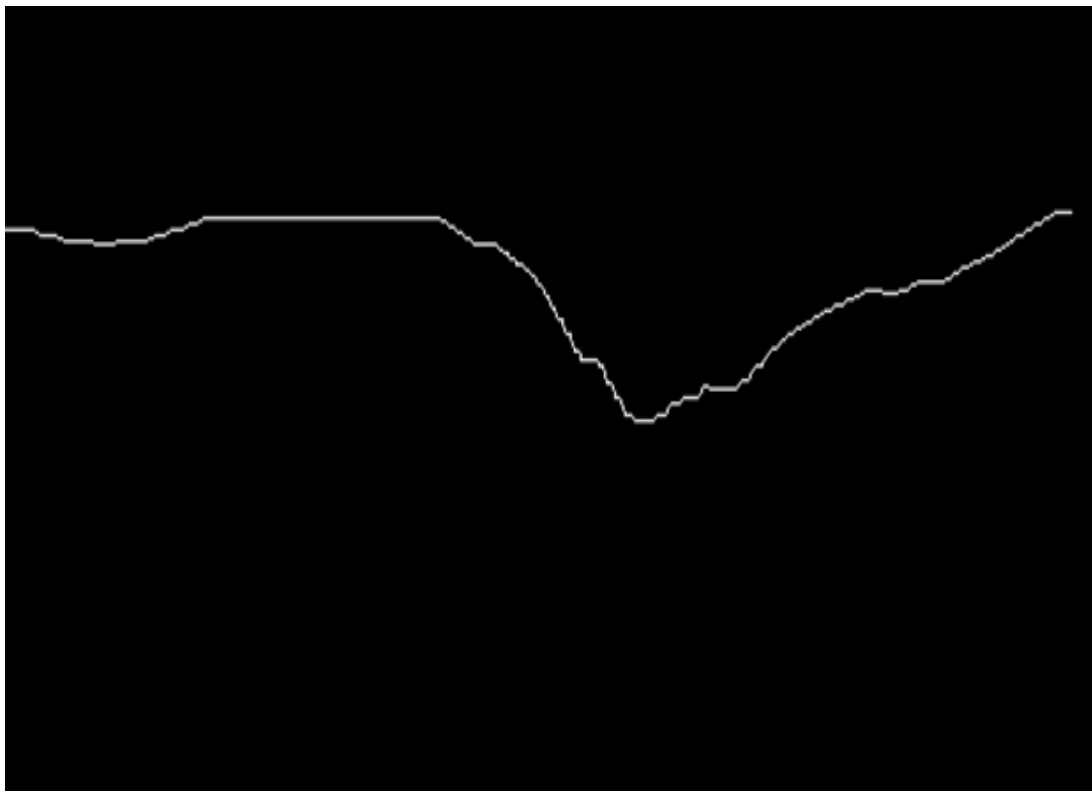


Figure 39:Section North-East/Sud-Ouest

❖ **Roche saine Niveau relatif 268 m**

- **Diamètre 140 mm, hauteur de bourrage 3 m**

Dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest et pour ces paramètres, on constate à travers la figure 40 que les fragments parcourent une distance maximale de 240 m. Dans cette direction de tir, les fragments de roche de portée maximale 240 m demeurent dans la fosse. Les engins de production aux alentours de la fosse peuvent y rester et non sortir de la fosse, permettant une hausse de la productivité.

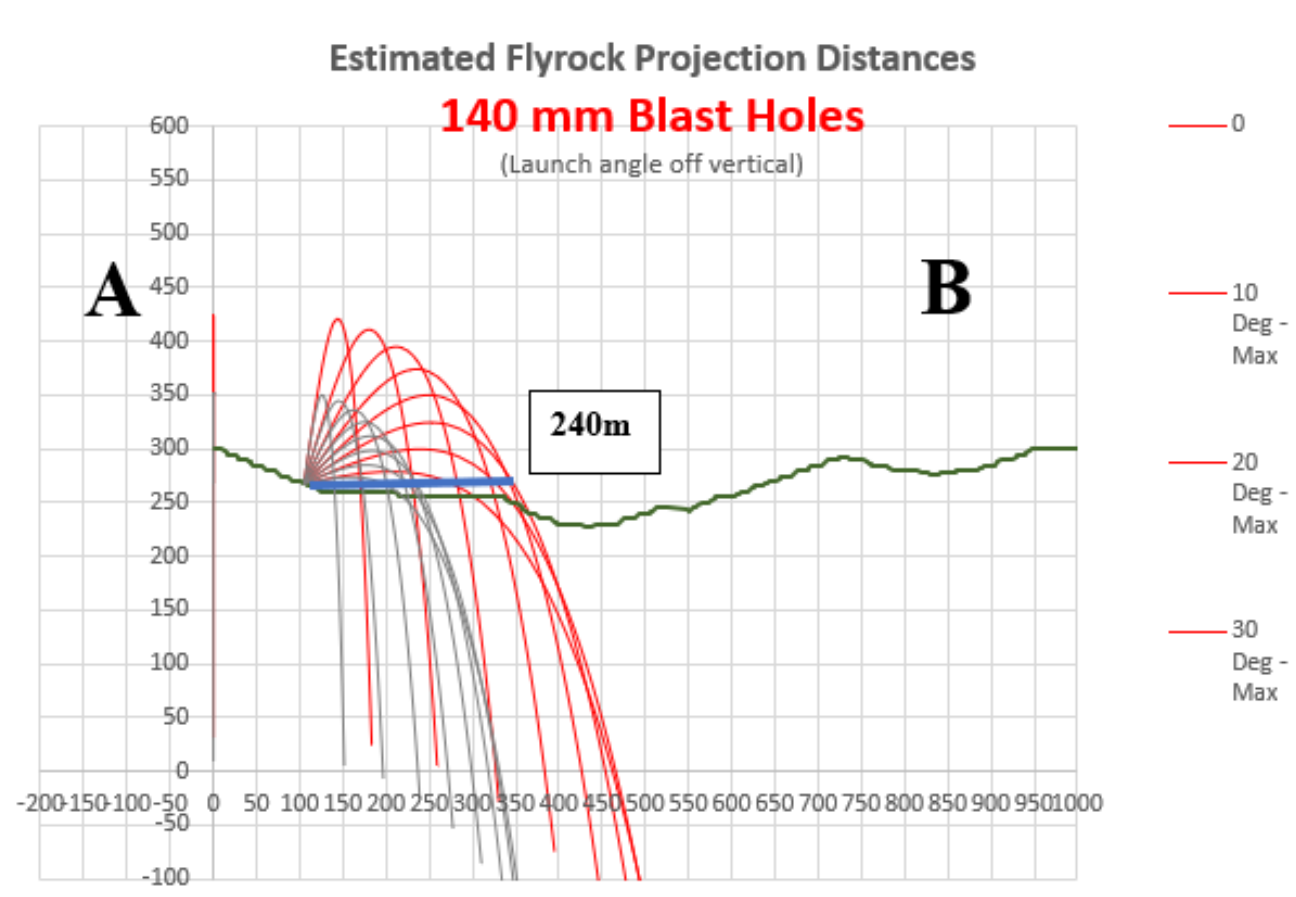


Figure 40: Section Nord-Est/Sud-Ouest roche saine Niveau 268 m

❖ Roche transitionnelle

- **Diamètre 127 mm et une hauteur de bourrage de 2.8 mm**

Les résultats de cette simulation sont illustrés sur la figure 41.

La distance maximale de projection des pierres est équivalente à 179 m avec un angle de 60° . Dans ce cas, il est possible de mettre les équipements dans la fosse avec une marge de tolérance.

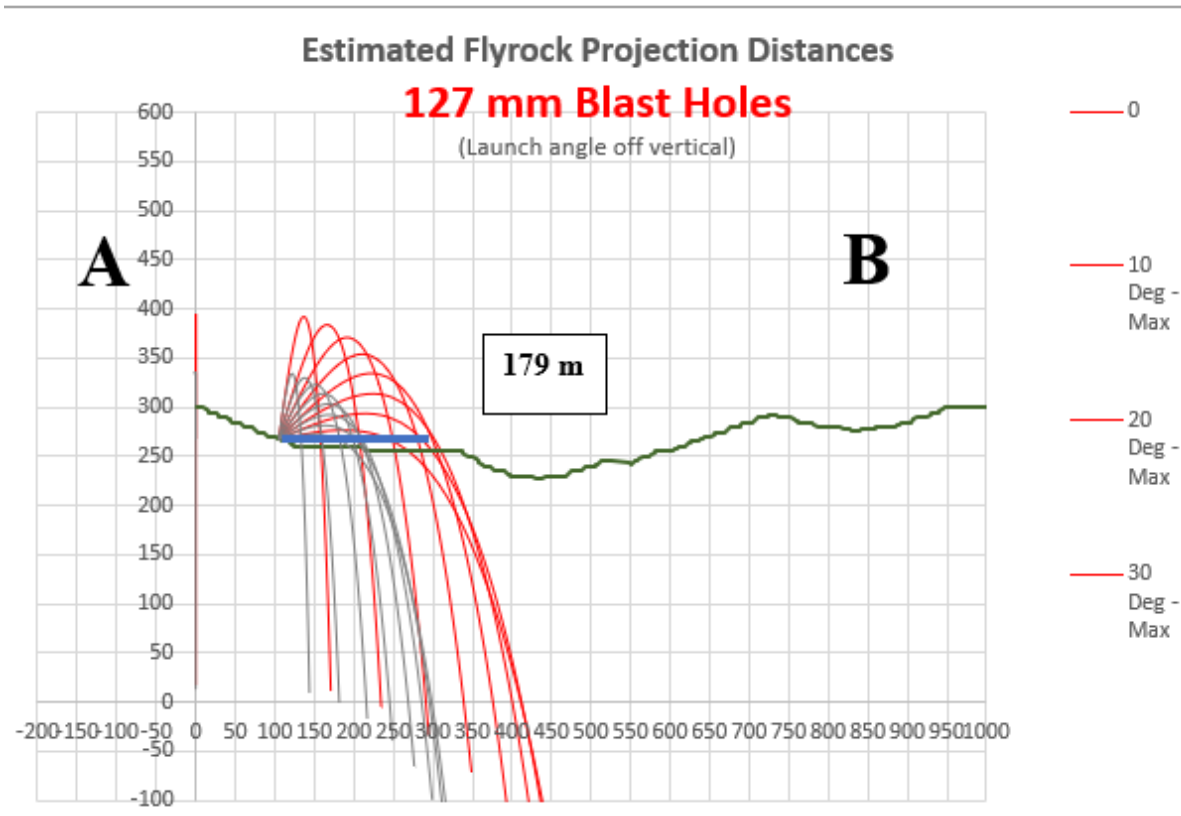


Figure 41 :Section North-East/South-West roche transitionnelle niveau 268 m

Dans un contexte où la profondeur n'est pas un facteur déterminant, les distances maximales de projections en fonction des paramètres de tirs standard utilisés à la mine d'or d'Ity (la hauteur de bourrage, la densité de la roche, la densité de l'explosif, la hauteur de banc) peuvent être défini, à travers les simulations effectuées, le tableau VI met en évidence les projections maximales en fonction des paramètres de tirs semblable et permet d'évaluer l'impact du diamètre du trou sur la portée.

Tableau VI: Portée maximale de projection

	Walter			
	Transition		Roche saine	
Diamètre(mm)	127	140	127	140
Bourrage minimal(m)	2.8	2.8	2.3	2.3
Hauteur de banc	5		5	
Flèche(m)	45	57	75	127
SDB(m/kg)	1.124	1.042	0.966	0.899
Portée Max(m)	194	240	304	372
Bourrage maximal(m)	3.3	3.3	3	3
Hauteur de banc	10		10	
Flèche(m)	50	42	64	57
SDB(m/kg)	1.282	1.185	1.187	1.099
Portée Max (m)	149	186	193	240



Le tableau ci-dessus présente les valeurs des paramètres standards utilisés à la mine d'or notamment le diamètre des trous et la hauteur de bourrage afin de mettre en évidence les différentes portées maximales résultant de ces configurations de tir. L'analyse du tableau VI révèle que, pour les deux diamètres considérés (127 mm et 140 mm), les portées varient de manière significative malgré la similarité des hauteurs de bourrage appliquées. Il apparaît clairement que, quelle que soit la hauteur de bourrage retenue, les distances de projection obtenues avec le diamètre 140 mm sont systématiquement supérieures à celles observées avec le diamètre 127 mm. Dans la roche saine, les distances atteintes sont encore plus importantes que dans la roche de transition. En effet, la roche saine offre un confinement plus élevé, ce qui entraîne une libération plus brusque de l'énergie explosive et, par conséquent, une projection des fragments sur de plus grandes distances. La portée maximale associée au diamètre 140 mm dépasse celle du diamètre 127 mm, principalement en raison de la quantité plus importante d'explosif contenue dans un trou de 140 mm pour une même hauteur de bourrage. En d'autres termes, plus le volume d'explosif est élevé, plus la distance de projection potentielle augmente. Ainsi, dans une optique de réduction des risques liés à la projection de fragments, il est préférable d'utiliser des taillants de diamètre 127 mm, qui permettent de minimiser les portées de projection.

II.3.5 Détermination de la zone d'exclusion

Dans le tableau VII, on constate que la zone d'exclusion varie en fonction des paramètres assignés aux tirs. On constate qu'au niveau de la zone transitionnelle, la zone d'exclusion peut être réduite jusqu'à 252.2 m pour une hauteur de bourrage de 2.8 m en utilisant un diamètre de 127 mm, 193.7 m pour une hauteur de bourrage de 3.3 m et de 241.8 m pour un diamètre de 140 m. Il sera possible d'adapter ces distances pour les tirs de mines dans ces conditions afin d'améliorer la productivité des engins. Au niveau de la roche saine, pour une hauteur de bourrage de 3m avec 127 mm, on a une distance de 250 m pour la zone d'exclusion.



Tableau VII: Zones exclusion

	Walter			
	Transition		Roche saine	
Diamètre(mm)	127	140	127	140
Bourrage minimal(m)	2.8	2.8	2.3	2.3
Hauteur de banc	5		5	
Flèche(m)	45	57	75	127
SDB(m/kg)	1.124	1.042	0.966	0.899
Portée Max	194	240	304	372
Distance d'exclusion(m)	252.2	312	395.2	483.6
Différence Distance	47.8	-12	-95.2	-183.6
Bourrage maximal(m)	3.3	3.3	3	3
Hauteur de banc	10		10	
Flèche(m)	50	42	64	57
SDB(m/kg)	1.282	1.185	1.187	1.099
Portée Max	149	186	193	240
Distance d'exclusion(m)	193.7	241.8	250.9	312
Différence Distance	106.3	58.2	49.1	-12

Pour des paramètres de tirs comme énumérés dans le tableau VIII, la zone d'exclusion peut être réduite à 250 m, dans le cas contraire, il serait préférable de les envoyer dans une zone plus sécuritaire.

Tableau VIII: Zone exclusion adaptée

	Transition		Roche saine
	127	140	127
Hauteur de Bourrage(m)	2.8&3&3.3	3.3	3
Distance d'exclusion(m)	250		

❖ Aspect sécuritaire lié à la réduction

• Vibrations et suppressions aérienne

À la suite de plusieurs tirs effectués, les données de vibrations et de suppressions aérienne ont été prélevés afin de s'assurer que les tirs se sont effectués conformément aux réglementations liées aux seuils de vibrations et de suppressions aériennes établies.



L'analyse du tableau montre clairement que les tirs effectués génèrent des niveaux de vibrations conformes aux réglementations relatives aux seuils maximaux admissibles. Cela indique que les vibrations produites ne présentent aucun danger pour les engins. Ainsi, positionner les équipements à une distance de 250 m par rapport au front de tir ne constituerait aucun risque. Selon l'**USBM (United States Bureau of Mines)**, le seuil à partir duquel les vitres les plus fragiles peuvent se briser est de **145 dB** pour les équipements. En ce qui concerne les vibrations, il apparaît que l'ensemble des tirs présentés dans le tableau affiche des valeurs nettement inférieures au seuil recommandé sur le site, soit 10 mm/s, ce qui confirme la possibilité d'implanter les engins à cette distance en toute sécurité.

Tableau IX: Vibrations et suppressions aérienne

DATE	SHOT ID	PITS	LOCATION	DISTANCE (m)	ACOUSTIQUE (dB)	VIBRATION (mm/s)
VIBRATION_June_2025						
Mar-25	ltc_130_125_101&sump ltc_135_130_501	ITY	Daapleu bridge	751	119	0.78
-Mar-25	Lep_220_215_307p1 Lep_210_205_305&306p2	Leplaque	MSA_Leplaque	1123	94	0.93
-Mar-25	Bak_205_195_303&302p1&901	Bakatouo	MSA_Leplaque	743	110	1.57
-Mar-25	Bak_205_195_302 ltc_130_120_302	BAKATOOU/ITY	New SFTP Go line	622	108	0.64
-Jun-25	Bak_195_190_301&302 Bak_195_185_101p2 Wal_215_205_902	Bakatouo Walter	New CORICA Go line	682	131	0.60
-Jun-25	Bak_195_190_303 Wal_215_205_902p1	Bakatouo Walter	New CORICA Go line	686	100	0.40
-Jun-25	Wal_205_195_101 Wal_215_205_902p2	Walter	New SFTP Go line	685	104	0.40
-Jun-25	Lep_210_205_309 Lep_210_200_901	Leplaque	MSA_Leplaque	981	116	0.40
-Jun-25	ltc_115_105_301&Toes	Itycutback	Pont de Daapleu	736	118	0.40
	Bak_190_185_103	Bakatouo	New CORICA Go line	686	127	0.40
	Bak_190_185_305	Bakatouo	New SFTP Go line	685	127	0.30
	Wal_195_185_102	Walter	New SFTP Go line	688	133	1.00
	Lep_205_200_307 & Toes	Leplaque	MSA_Leplaque	981	100	0.50

III.3.6 Etude comparative des performances des diamètres utilisés

L'étude comparative des performances des diamètres de foration met en évidence plusieurs paramètres, notamment la disponibilité, l'utilisation de la disponibilité, le métrage foré par heure, le temps effectif de foration et, enfin, le niveau de fragmentation. La figure 42 synthétise les résultats de cette étude.

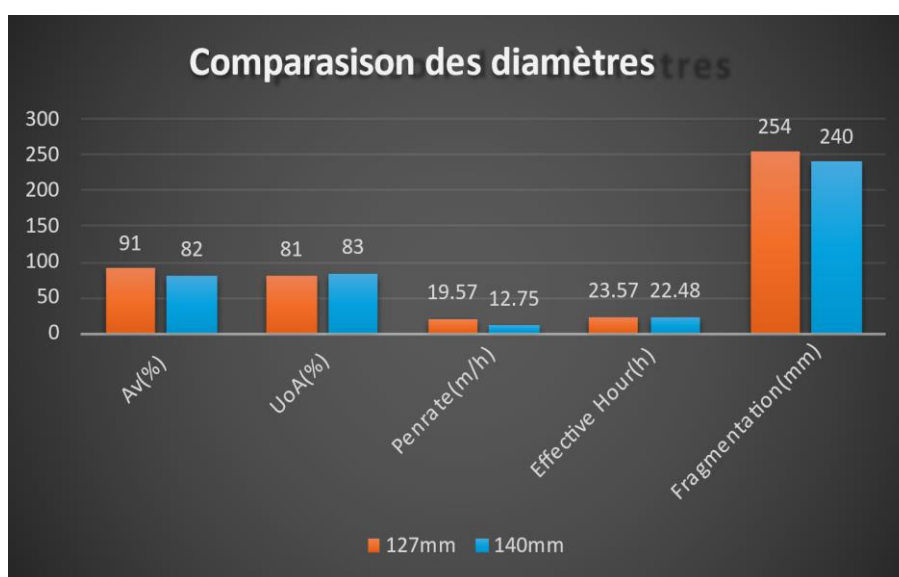


Figure 42: Comparaison des diamètres

L'analyse du tableau montre que, sur les cinq (5) critères de comparaison, le diamètre 127 mm présente une performance dominante dans la majorité des cas. Il affiche une meilleure disponibilité, même si, en matière d'utilisation de cette disponibilité, le diamètre 140 mm se révèle légèrement plus performant. Concernant le métrage foré par heure, l'écart observé est significatif : le diamètre 127 mm présente environ cinq (5) mètres de plus par heure par rapport au 140 mm. Cela indique qu'avec le 127 mm, il est possible de forer un plus grand nombre de trous par heure et donc par jour dans des conditions de terrain équivalentes.

En ce qui concerne la fragmentation, une différence notable apparaît en faveur du diamètre 140 mm. Toutefois, compte tenu de l'objectif lié au P80 défini comme la taille de maille (en mm) à travers laquelle 80 % de la masse totale des fragments passent) définit qui est de 350

mm, on peut conclure que les deux diamètres sont efficaces en termes de fragmentation après l'analyse des différents fragments issus du tir.



Figure 43: Carte nouvelle zone exclusion engins

Avec cette nouvelle zone d'exclusion fixée à 250 m pour les équipements, le cercle d'exclusion correspondant est représenté ci-dessus.

Dans les situations où la profondeur de la fosse empêche les fragments projetés de basculer dans une fosse adjacente, et lorsque les conditions de sécurité notamment les niveaux de vibration et les surpressions aériennes sont respectées, cette configuration permettrait d'accroître la productivité des pelles hydrauliques.

Par ailleurs, si les paramètres définis pour le tir sont conformes aux conditions permettant le stationnement des engins à 250 m, cette réduction de distance pourrait également améliorer significativement la productivité des équipements.

❖ Impact sur la productivité des engins

L'étude d'impact s'est effectuée sur les mois de Juin, Juillet. La réduction de cette zone d'exclusion influence la productivité des pelles, ces graphes ci-dessous témoignent de l'impact positif que la nouvelle zone de 250m a sur les pelles hydrauliques. Le temps de chargement de chargement d'un dump truck est en moyenne quatre minutes. Sachant que la réduction de la zone d'exclusion à 250 m nous permet d'avoir un temps supplémentaire de 6 minutes, les graphes ci-dessous mettent en évidence l'impact de cette nouvelle zone d'exclusion sur la productivité de ces pelles hydrauliques. L'étude c'est effectué sur deux (02) mois.

• JUIN

Pour toutes les pelles travaillant dans ces mois dans les fosses de Walter et Bakatouo, ces graphes mettent en évidence l'impact de cette réduction sur leur productivité.

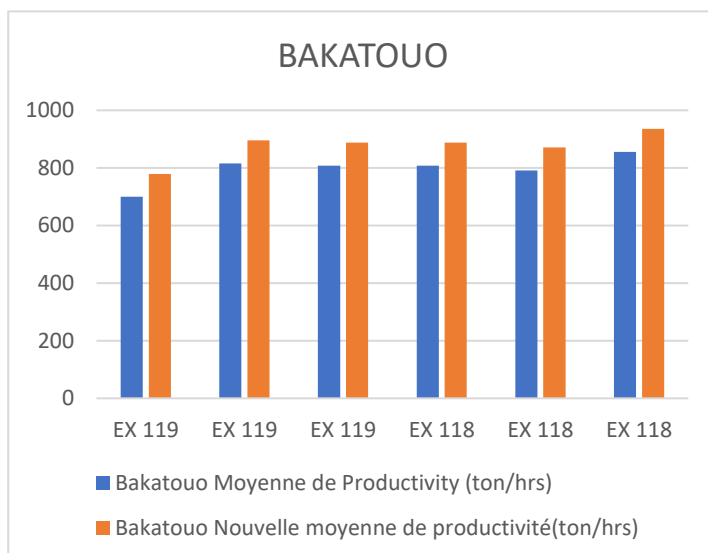


Figure 44: Bakatouo en Juin

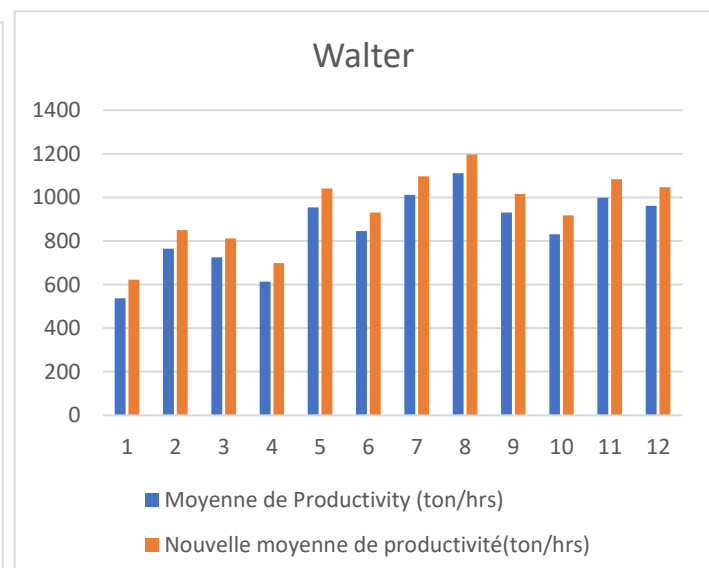


Figure 45: Walter en Juin

• **JUILLET**

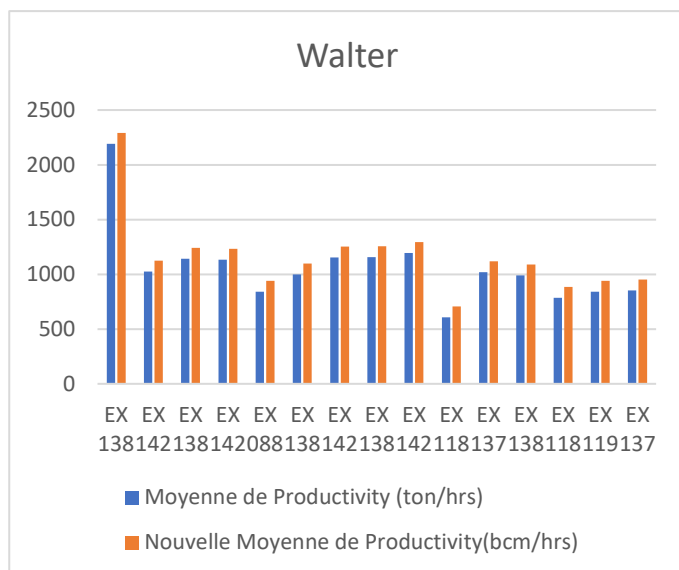


Figure 46: Walter en Juillet

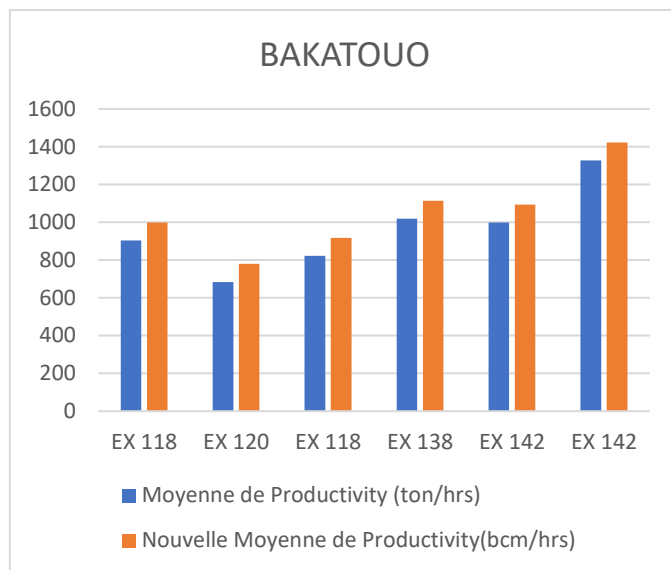


Figure 47: Bakatouo en Juillet

A la mine d'or d'Ity, les fosses de Walter et Bakatouo sont collées, de ce fait, les tirs à l'explosifs généralement effectuées dans l'une des fosses demandent l'évacuation des engins de l'autre fosse.

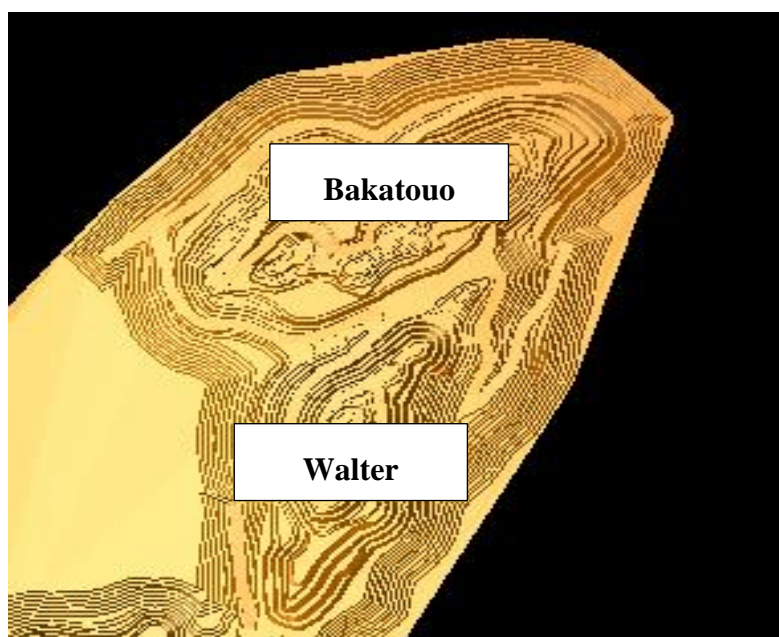


Figure 48: Fosse de Walter et Bakatouo



IV. RECOMMANDATIONS

- ❖ Utilisation du modèle de prédiction
 - S'assurer que les coordonnées des sections soient parfaitement entrées ;
 - Faire une lecture précise de la distance de projection des fragments ;
 - Vérifier les paramètres d'entrées avant toute simulation.
- ❖ Des activités du forage et dynamitage
 - Adapter la quantité d'explosif chargé au mètre foré après vérification ;
 - Respecter la taille du matériau de bourrage recommandé pour un confinement optimale de l'énergie ;
 - Eviter les surcharges d'explosifs ;
 - Respecter la densité de l'explosif utilisé lors du chargement ;
 - Utiliser les taillants de diamètre 127 mm pour les tirs avec une hauteur de bourrage de 2.8, 3.3 et 3 m dans la transition et 3 m pour la roche saine.



CONCLUSION

L'objectif de notre étude était de mettre en place un outil d'aide à la prédiction de la distance maximale de projection des particules lors des tirs à l'explosif. Pour ce faire, une recherche bibliographique a été effectuée afin d'avoir des informations sur les contours du thème. Par la suite il a été question de faire l'état des lieux en analysant la gestion actuelle des zones d'exclusion ainsi qu'identifier les paramètres influant la distance de projection des particules. Pour finir, modéliser la trajectoire de projection en fonction des paramètres dit d'entrées et estimer la distance maximale de projection. De cette méthodologie, il ressort que les paramètres influençant la projection des fragments sont entre autres : le diamètre du trou, la hauteur de bourrage et la densité de l'explosif et la densité de la roche. Les simulations ont été effectuées sur la fosse de Walter, Il en ressort dans un contexte où la profondeur influence la projection des particules, il est possible de laisser les engins dans leur environnement de travail pendant la procédure de tir facilitant la reprise des activités après le tir et permettra d'améliorer la productivité des engins. Les zones d'exclusion peuvent être réduite à 250 m de la volée à dynamiter dans certaines conditions, lorsque nous sommes dans un matériau transitionnel avec pour une hauteur de bourrage de 3.3 m, 3 m, et 2.8 m avec un diamètre de **127** mm et lorsque nous nous trouvons dans la roche saine pour une hauteur de bourrage de 3m un même diamètre de **127mm**.

Pour arriver à cela, nous avons suggéré d'utiliser les diamètres de forage de 127 mm pour les tirs, respecter la taille du matériau de bourrage afin d'optimiser le confinement, éviter les ajouts d'explosifs, respecter la densité d'explosif utilisé lors du chargement. Concernant le modèle, faudrait s'assurer que les paramètres entrés sont les bons, toujours définir la position du tir dans la fosse.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AEL Mining services (2014). Surface blasting handbook 52p

A. Roux et Al. (2016). *Etude de faisabilité*, ITY CIL PROJECT NATIONAL INSTRUMENT 43-101 TECHNICAL REPORT, 502p.

BESSOLES (1977), Géologie de l'Afrique de l'Ouest. Le craton Ouest Africain. Mémoire B.R.G.M Paris. No 88,402p.

BONY G. (2015), *Evaluation et optimisation de la sélectivité dans l'exploitation des minerais d'ITY*, mémoire de fin d'étude, 67p.

Camil, J. (1984). *Pétrographie, chronologie des ensembles archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire)*. Implications pour l'histoire géologique du craton ouest africain.

Thèse de Doctorat ès Sci. Univ d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 306 p.

Cameron K. McKenzie, Blastotechnology, Australia. (2009). *Flyrock Range & Fragment Size Prediction*. International Society of Explosives Engineers, 17p.

DOSSO. (2017). *Géologie simplifiée de la zone d'Ity*, SMI-2017-Rapport de fin de campagne Daapleu, 125p.

Kotchi Nogbou Wilfried G. (2019). Prédiction des niveaux de vibration et de surpression aérienne 89p ;

KOUMELAN, (1996), Géochronologie et géochimie des formations Archéennes et protérozoïque de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implication pour la transition Archéenne protérozoïque.

N'GORAN Venance. (2018). *Blast Hole Diagram*, Bakatouo 300m Blast Clearance_Flyrock Assessment_Intern (Non publié)

N'GORAN Venance. (2017). *Flyrock – Probability in Design*, Bonikro - Hiré - Akissi So 250m Pit- Flyrock Projection Distance Estimates. (Non publié)

NICHOLLS H.R., JOHNSON C.F., DUVALL W.I. (1971). Blasting vibrations and their effects on structures. U.S. Bureau of mines, bulletin 656.



PAPON, A. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Mem. Bur. Res. Géol. Paris, N° 80, 284 p.

Tagini (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat de l'Université de Lausanne et publication SODEMI, 302p.

THIAM Mohamed, (2017). *Etude prévisionnelle des projections de pierres pendant les tirs à L'explosif à la mine d'Hiré : Cas de la fosse d'exploitation Akissi-so 250m.* Mémoire de Fin d'Etude, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny/L'Ecole Supérieure des Mines et Géologie (ESMG-HB/ESMG), Yamoussoukro-Côte d'Ivoire, 69p. (Non publié)



ANNEXE

ANNEXE I:Variation de la projection maximale en fonction de la variation de la hauteur de bourrage	II
ANNEXE III:Variation de la projection maximale en fonction de la variation du diamètre du trou.....	II
ANNEXE IV: Variation de la projection maximale en fonction de la variation de la densité de la roche	II
ANNEXE V: Volume de matériau par niveau dans les fosses	II
ANNEXE VI: Equipment de protection Individuel	III
ANNEXE VII: Sismographe.....	III
ANNEXE VIII: Blendex	IV
ANNEXE IX:Chaine d'extraction du minerai.....	IV



ANNEXE I: Variation de la projection maximale en fonction de la variation de la hauteur de bourrage

Hauteur de bourrage	1.5	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.2
Portée maximale	537	414	326	281	230	191	161

ANNEXE II : Variation de la projection maximale en fonction de la variation de la densité de la roche

Densité de la roche	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2
Portée maximale	204.31	185.99	176.32	166.68	150.93	139.56	126.01	113.22	102.54	87.72	73.47

ANNEXE II: Variation de la projection maximale en fonction de la variation du diamètre du trou

Diamètre du trou	50	100	150	200
Portée Maximale	17	101	267	514

ANNEXE III: Variation de la projection maximale en fonction de la variation de la densité de la roche

Densité de l'explosif	1.15	2	2.2	2.5	2.8	3.1
Portée maximale	180	269	288	316	343	369

ANNEXE IV: Volume de matériau par niveau dans les fosses

	200-190	190- 180	180 - 170	170-160	160-150	150-140	140-90
Transition	189313	1526109	1213578	993281	6859	656	0
Fresh	1848047	59109	26109	19422	736922	507891	552640

	280-270	270-260	260-250	250-240	240-230	230-220	220-210	210-200	200-190	190-180	180-160
Transition	875	17344	1005391	1575000	615625	202172	59953	15063	1359	0	0
Fresh	4016	10563	50766	661063	1773000	1602438	0	817203	324391	195484	403172

ANNEXE V: Equipement de protection Individuel



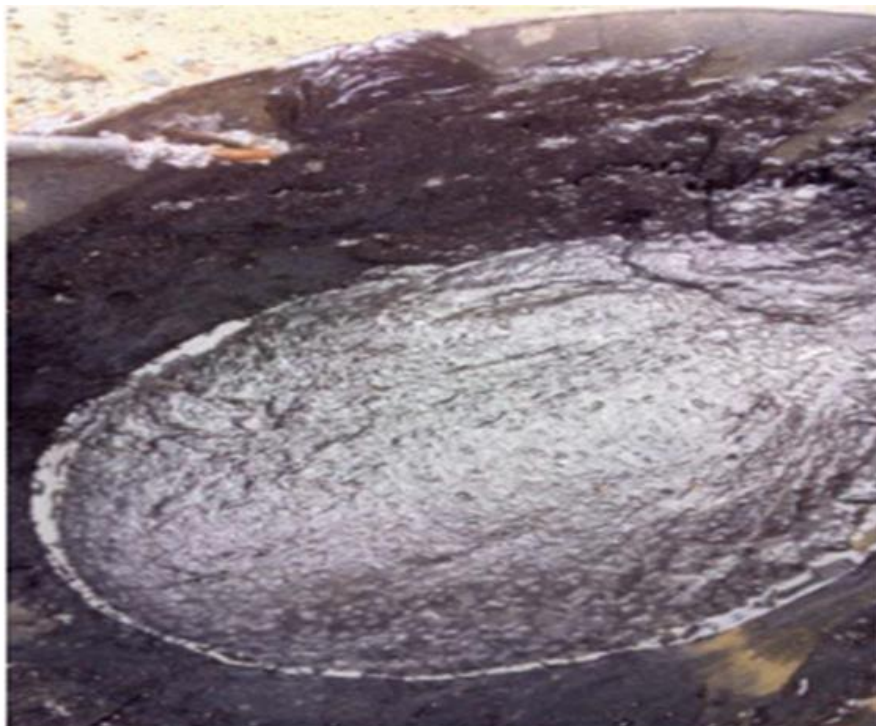
ANNEXE VI: Sismographe



Le sismographe a plusieurs composantes qui sont :

- 1.→ Le sismogramme capte la vibration et le bruit provoqué par le dynamitage.
- 2.→ Les câbles qui relient le géophone et le microphone au sismographe.
- 3.→ Le géophone capte la vibration et le transmet au sismogramme.
- 4.→ Le microphone capte le bruit et le transmet au sismogramme.

ANNEXE VII: Blendex



ANNEXE VIII: Chaîne d'extraction du minerai

