

RESUME

L'exploitation minière souterraine nécessite un remblayage performant pour garantir la stabilité des excavations, la sécurité des travailleurs et la continuité des opérations. Ce mémoire présente une étude technico-économique visant à déterminer le remblai optimal pour les excavations de la mine de Kamoya. La méthodologie combine une revue de la littérature, la caractérisation des matériaux, l'analyse géotechnique et mécanique et une évaluation comparative de quatre solutions : remblai rocheux, remblai hydraulique, remblai en pâte cimentée et remblai mixte. Les critères d'évaluation incluent la résistance mécanique, la stabilité des excavations, les conditions de mise en œuvre et de transport, le drainage et le coût global.

Les principaux résultats montrent que le remblai rocheux présente une résistance moyenne à la compression de 0,325 MPa pour un coût estimatif de 931 210,94 USD. Le remblai hydraulique affiche la meilleure performance mécanique avec 1,51 MPa et un coût estimé à 646 957,42 USD ; il assure une excellente stabilité des excavations, un remplissage efficace des vides, une mise en œuvre simple et un coût d'exploitation relativement faible. Le remblai en pâte cimentée atteint une résistance moyenne de 1,015 MPa, mais son coût de production est élevé à 567 217,86 USD en raison d'une forte consommation de liant.

L'analyse technico-économique conclut que le remblai hydraulique représente le meilleur compromis entre performance technique et rentabilité économique pour la mine de Kamoya. Sa combinaison de résistance satisfaisante, faible coût de production, facilité de mise en œuvre et efficacité de remplissage justifie sa recommandation comme solution optimale pour les conditions d'exploitation étudiées.

Mots-clés : exploitation minière souterraine, remblayage, remblai hydraulique, stabilité des excavations, sécurité minière, étude technico-économique, mine de Kamoya.

ABSTRACT

Effective backfilling is essential in underground mining to ensure excavation stability, worker safety and operational continuity. This thesis presents a techno-economic assessment to identify the optimal backfill type for underground excavations at the Kamoya mine.

The study combined a literature review, material characterization, geotechnical and mechanical property analyses, and a comparative evaluation of four backfill options: rockfill, hydraulic backfill, cemented paste backfill and mixed backfill. Evaluation criteria included mechanical strength, excavation stability, placement and transport feasibility, drainage and overall cost.

Rockfill showed an average compressive strength of 0.325 MPa and an estimated cost of 931,210.94 USD. Hydraulic backfill provided the highest mechanical performance at 1.51 MPa with an estimated cost of 646,957.42 USD; it delivered excellent excavation stability, efficient void filling, straightforward placement and relatively low operating cost. Cemented paste backfill reached an average strength of 1.015 MPa but incurred higher production costs (estimated 567,217.86 USD) due to substantial binder consumption. Mixed backfill results were considered in the comparative analysis though specific figures were not detailed.

The techno-economic analysis indicates that hydraulic backfill offers the best balance of technical performance and economic viability for the Kamoya mine. Its satisfactory strength, low production cost, ease of placement and effective void-filling capability support its selection as the optimal backfilling solution under the mine's operating conditions.

Keywords — underground mining; backfilling; hydraulic backfill; excavation stability; mine safety; techno-economic study; Kamoya mine.

TABLE DE MATIERES

Table des matières

RESUME.....	I
ABSTRACT	II
TABLE DE MATIERES.....	III
LISTE DES SYMBOLES DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS	VI
EPIGRAPHE	VII
DEDICACE.....	VIII
AVANT- PROPOS	Erreur ! Signet non défini.
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	X
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES REMBLEYAGE EN MINE SOUTERRAINE ET CADRE D’ETUDE	3
I.1.INTRODUCTION.....	3
1.2. CADRE D’ETUDE.....	3
1.2.1. Situation géographique de la mine	3
I.3. APERÇUS SUR LE REMBLAYAGE DANS UNE MINE SOUTERRAINE	4
I.3.1. Définition et objectifs du remblayage dans une mine souterraine	4
I.3.2. Différentes méthodes des remblayages.....	5
1.4. METHODES D’EXPLOITATION	7
I.5. CONCLUSION PARTIELLE	16
CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTERATURE.....	18
II.1. INTRODUCTION.....	18
II.2. GENERALITES SUR LES REMBLAIS.....	18
II.2.1. Remblais Rocheux	18
II.2.2. Remblais Hydrauliques.....	19

II. 2.3. Remblais en Pâte Cimentée	20
II.2.4. Remblais Mixtes	21
II.4. CONCLUSION PARTIELLE.....	26
CHAPITRES III. MATERIEL, METHODES ET CARACTERISATION DU REMBLAI ...	27
III.1. INTRODUCTION	27
III.2. METHODE ET MATERIEL UTILISE.....	27
III.2.1. Matériaux utilisés	27
III.2.2. Description du matériel utilisé	28
III.3. CARACTERISATION DU REMBLAI	31
III.3.1. Plan d'échantillonnage et préparation d'échantillon	31
III.4. CONCLUSION PARTIELLE	33
CHAPITRE IV. ÉTUDE TECHNICO-ECONOMIQUE DU CHOIX DU REMBLAI OPTIMAL	34
IV.1. INTRODUCTION	34
IV.2. QUANTIFICATION DES MATERIAUX.....	34
IV.2.1. Remblayage hydraulique.....	34
IV.2.2. Remblai en pate cimentée	40
IV.2.3. Remblai rocheux (cimenté)	41
IV.3. MODELE DE PREDICTION DE LA RESISTANCE DES REMBLAIS CIMENTES	42
IV.3.1. Prédiction de la résistance du remblai Hydraulique.....	42
IV.3.2. Prédiction de la résistance du remblai en pate cimenté.....	43
IV.3.3. Prédiction de la résistance du remblai rocheux.....	43
IV.4. CONCLUSION PARTIELLE	44
CHAPITRE V. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	45
V.1. INTRODUCTION	45
V.2. ANALYSE ECONOMIQUE	45
V.2.1. Remblayage hydraulique cimenté	46

V.2.2. Remblai en pate cimenté	46
V.2.3. Le remblai rocheux.....	46
V.3. INTERPRETATION DES RESULTATS	46
V.3.1. Analyse économique et géotechnique des types de remblais	46
V.3.2. Gestion de l'eau dans le remblayage hydraulique cimenté	47
V.3.3. Résistance et stabilité à long terme	48
V.3.4. Problèmes liés au transport.....	48
V.3.5. Aspects environnementaux et durabilité	48
V.4. CONCLUSION PARTIELLE	49
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS.....	50
1. CONCLUSION GENERALE	50
2. SUGGESTIONS ET RECOMMANDATIONS.....	52
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54

LISTE DES SYMBOLES DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS

- σ_c : Résistance à la compression uniaxiale (MPa)
- UCS : Résistance à la compression uniaxiale (Uniaxial Compressive Strength)
- MPa : Mégapascal
- m³ : Mètre cube
- % : Pourcentage
- ρ : Masse volumique (kg/m³)
- E/C : Rapport Eau/Ciment
- K : Coefficient de perméabilité
- V : Volume
- V' : Volume foisonné
- Sr : Degré de saturation
- e : Indice des vides
- CAF : Cemented Aggregate Fill
- CRF : Cemented Rock Fill
- CSRF : Consolidated Sand Rockfill
- CSWF : Consolidated Sand Waste Fill
- GU : General Use Cement (Ciment Portland à usage général)
- PAF : Paste Aggregate Fill
- RDC : République Démocratique du Congo
- RPF : Rocky Paste Fill
- RPC : Remblai en Pâte Cimentée
- URSTM : Université de Recherche Scientifique et Technologique Minière
- USD : Dollar américain

EPIGRAPHE

« La sécurité est un élément très capital dans
l'exploitation des mines. »

AMIRAL J.K

DEDICACE

**Ce travail est dédié à ma très chère
famille, sans oublié ceux qui permis de le
rédiger**

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 Localisation de la mine de Kamoya.....	4
--	---

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1 Classification des remblais hydraulique en fonction du pourcentage de fines ...	20
Tableau III. 1 Composition chimique du liant utiliser	27
Tableau IV. 1 Caractéristiques attendues des boues des résidus.....	37
Tableau IV. 2 Résultat sur la construction des barricades	39
Tableau IV. 3 Billan du remblai hydraulique.....	40
Tableau IV. 4 les données couramment pour le remblai en pate cimenté.....	40
Tableau V. 1 Coût unitaire des trois types de remblai étudiés pour notre projet	45

INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation minière souterraine occupe une place importante dans l'industrie extractive, en particulier lorsque les gisements deviennent profonds et que l'exploitation à ciel ouvert n'est plus économiquement ou techniquement favorable. Dans ce contexte, la stabilité des excavations souterraines constitue une préoccupation majeure, car elle conditionne à la fois la sécurité du personnel, la préservation des ouvrages miniers et la continuité de la production. Après l'extraction du minerai, les vides laissés doivent être contrôlés afin d'éviter la dégradation des terrains avoisinants, la perte de stabilité des ouvertures et les interruptions de production. Le remblayage apparaît alors comme une solution technique incontournable, puisqu'il permet non seulement de soutenir les excavations, mais aussi de faciliter la reprise éventuelle de certaines zones minéralisées.

À la mine de Kamoya, comme dans plusieurs mines souterraines, la poursuite des opérations dépend fortement de la maîtrise des contraintes géotechniques liées aux chambres exploitées. Le choix du type de remblai à utiliser ne doit pas se faire de manière arbitraire. Il doit tenir compte de plusieurs paramètres, notamment la résistance mécanique recherchée, le comportement du remblai dans le temps, les conditions géologiques du site, les exigences de sécurité et surtout les coûts de mise en œuvre. Un remblai très performant sur le plan technique peut s'avérer trop coûteux, tandis qu'un remblai moins onéreux peut ne pas garantir le niveau de stabilité requis. Il devient donc nécessaire de rechercher un compromis optimal entre performance technique et rentabilité économique.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, intitulé : **Étude technico-économique du choix du remblai optimal pour assurer la stabilité des excavations dans une mine souterraine (Cas de la mine de Kamoya)**. Cette étude vise à analyser les différents types de remblais pouvant être utilisés dans le contexte de Kamoya, à comparer leurs avantages et leurs limites, puis à déterminer la solution la plus adaptée aux exigences de stabilité et aux coûts.

La problématique centrale de cette étude est la suivante : **quel type de remblai permettrait d'assurer durablement la stabilité des excavations souterraines de la mine de Kamoya tout en restant économiquement acceptable ?** Cette question traduit la nécessité d'un choix rationnel fondé sur des critères à la fois techniques et financiers, dans un environnement où la sécurité et la rentabilité doivent être conciliées.

L'objectif général de ce travail est donc de déterminer le remblai le plus approprié pour la mine de Kamoya. De façon spécifique, il s'agira d'identifier les différents types de remblais possibles, d'évaluer leurs performances techniques, d'estimer leurs coûts respectifs, puis de proposer celui qui offre le meilleur compromis entre stabilité et économie. Les résultats attendus devraient permettre de fournir à la mine un outil d'aide à la décision pour mieux orienter ses choix de remblayage.

Sur le plan méthodologique, ce travail reposera sur l'observation des conditions d'exploitation, la collecte des données techniques disponibles, l'analyse comparative des différents types de remblais et l'étude de leur impact sur la stabilité des excavations. L'approche adoptée sera donc à la fois descriptive, analytique et comparative, afin de déboucher sur des recommandations concrètes et applicables.

Ce travail s'articulera autour de plusieurs parties. La première présentera les généralités sur le remblayage en mine souterraine et cadre d'étude. La deuxième traitera sur une revue de la littérature. La troisième traitera du matériel, des méthodes et caractérisation du remblai. La quatrième sur l'étude technico-économique du choix du remblai optimal et enfin, la dernière partie proposera l'analyse et interprétation des résultats.

.

Ainsi, s'inscrit dans une démarche d'amélioration des pratiques minières souterraines, en mettant en évidence l'importance d'un remblayage bien choisi pour garantir la stabilité des ouvrages, la sécurité des travailleurs et la poursuite efficace des opérations minières à la mine de Kamoya.

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES REMBLEYAGE EN MINE SOUTERRAINE ET CADRE D'ETUDE

I.1.INTRODUCTION

L'exploitation minière constitue un secteur stratégique pour l'économie de la République Démocratique du Congo, en particulier dans la province du Haut-Katanga, qui renferme de nombreux gisements de cuivre et de cobalt. Parmi les sites miniers importants de cette région figure la mine de Kamoya, située dans le district de Kambove, connue pour ses minéralisations cuprifères et cobaltifères.

L'étude de cette mine permet de comprendre les principes de l'exploitation souterraine appliqués à un gisement métallique du Katanga. Le choix des méthodes d'exploitation dépend de la géométrie du gisement, de sa profondeur, de la stabilité des terrains encaissants et des objectifs de récupération du minerai. Ce chapitre présente donc les généralités sur la mine de Kamoya, son cadre géographique et géologique, ainsi que les méthodes d'exploitation utilisées ou adaptées à ce type de gisement.

1.2. CADRE D'ETUDE

1.2.1. Situation géographique de la mine

La mine de Kamoya est située dans le territoire de Kambove, dans la province du Haut-Katanga, au sud-est de la République Démocratique du Congo. Elle appartient au district minier de Kambove, une zone riche en gisements de cuivre-cobalt et bien connue dans l'histoire minière du Katanga.

La mine de Kamoya exploite principalement des minerais de cuivre et de cobalt. Dans cette région, on rencontre notamment des minéraux comme la carrollite, la chalcopryrite et d'autres sulfures de cuivre-cobalt. Ces substances font partie des ressources les plus recherchées dans l'industrie moderne, en raison de leur utilisation dans l'électricité, les alliages et les batteries. La présence de ces minerais rend le gisement économiquement important. Elle oblige aussi à adopter des méthodes d'exploitation capables de préserver la qualité du minerai et d'éviter une dilution excessive.

Cette société a été créée le 18 septembre 2008 par WAMBAO LIMITED, en abrégé «WAMBAO Ltd » en partenariat avec la GECAMINES par la signature de la convention d'Entreprise commune n°951/22805/SG/GC/2008. La COMIKA SAS exerce ses activités Dans la province du Haut-Katanga en

République Démocratique du Congo, elle est située à Environ 20 Km à l'Ouest de la ville de Likasi, précisément à Kambove.



Figure I. 1 Localisation de la mine de Kamoya

Le district minier de Kambove comprend plusieurs mines, parmi lesquelles Kamoya, Kamoya Sud, Shangolowe et Kamfundwa. Certaines de ces mines ont été exploitées historiquement par Gécamines, tandis que d'autres ont fait l'objet de partenariats ou de développements récents. Kamoya s'inscrit donc dans un ensemble minier structuré et ancien, marqué par des phases successives d'exploitation.

I.3. APERÇUS SUR LE REMBLAYAGE DANS UNE MINE SOUTERRAINE (Ibrahima HANE ; 2015)

I.3.1. Définition et objectifs du remblayage dans une mine souterraine

Le remblayage dans une mine souterraine consiste à combler les vides créés par l'extraction du minerai à l'aide de matériaux variés, tels que des résidus miniers, des roches stériles, souvent mélangés à du ciment et de l'eau. Cette opération joue un rôle crucial dans la stabilité et la sécurité de la mine.

Objectifs principaux :

- ✓ **Renforcer la stabilité du massif rocheux** afin de prévenir les éboulements et protéger la sécurité des mineurs.
- ✓ **Optimiser la récupération du minerai** en permettant une exploitation plus complète des réserves, notamment dans les gisements profonds ou complexes.

- ✓ **Réduire les affaissements en surface**, limitant ainsi les impacts environnementaux et les dégâts aux infrastructures.
- ✓ **Gérer écologiquement les déchets miniers** en réutilisant les résidus miniers comme matériau de remblayage au lieu de les stocker en surface.

I.3.2. Différentes méthodes des remblayages

Selon le moyen de mise en place de transport, nous distinguons principalement deux types de remblayages qui sont :

- Le remblayage mécanique ;
- Le remblayage hydraulique.

a) Le remblayage hydraulique

Dans cette forme du remblayage le remblai est transporté dans des tuyaux à l'aide d'un courant d'eau ou d'air. Le courant doit avoir une vitesse et une pression suffisante pour transporter le remblai.

✓ **Avantages**

- La distance de transport est grande ;
- L'espace vide est bien rempli ;
- La meilleure stabilité des éponges et par conséquent, le renforcement de la sécurité des travailleurs miniers ;
- Il permet le remblayage dans des endroits inaccessible et n'introduit pas des poussières.

✓ **Inconvénients**

- Prix de revient de remblayage élevé à cause de la grande consommation de l'énergie ;
- Il rend l'exhaure très coûteux car il amène de l'eau dans les fronts d'abatage et galeries ;
- Formation des poussières, il n'est pas possible de combattre les feux souterrains ;
- L'usure excessive des organes.

b) Remblayage mécanique

Le remblayage mécanique a un caractère moins laborieux. Il est employé d'habitude dans les exploitations où il est nécessaire de remblayer les volumes importants exploités avec les

stériles provenant des travaux d'ouverture, préparatoires et d'entretien. Les stériles de remblayage peuvent être acheminés à l'aide des engins de transport (camions bennes, chargeuse, bandes transporteuses), à l'aide des convoyeurs ou d'un scraper.

Le rendement des remblayeurs dépend de la pente et de la présence du gisement, de la nature de remblai, de la distance entre point d'approvisionnement et le point de déversement, de l'état des pistes, de la régularité d'année du remblai, des performances des engins ou du matériel, ...

✓ **Avantages**

- Adaptation facile ;
- Réduit la quantité de stériles à stocker en surface ;
- Ne nécessite pas une préparation préalable du remblai ;
- Utilise toutes dimensions des blocs ;
- Dans le cas des camions bennes, ce mode ne demande pas une infrastructure préalable ;

✓ **Inconvénients**

- Grand cout à la tonne transportée (pour les bennes) ;
- Investissement moins important par rapport au convoyeur ou scraper ;
- Un tassement faible ;
- Impraticable dans des endroits non-étendus ;
- Dans le cas d'un convoyeur du scraper, exige une installation préalable ;
- Investissement primaire important ;
- Les matériaux doivent être habituellement transporté de la surface, ce qui implique des coûts importants.

I.3.2.1. Sources est matériaux de remblayage

Ces sont des sables ou des roches concassées (15 à 100mm), les rejets des usines de concentrations des minerais et des scories métallurgiques. Les matériaux utilisés pour les remblayages peuvent être produits en souterrain ou en surface.

a) Source du remblai souterrain

Ces sont essentiellement :

- Les roches stériles simultanément avec les substances utiles provenant des intercalaires stériles ou des roches avoisinantes ;

- Les roches stériles provenant des creusements des travaux minier d'ouverture et préparatoires ;
- Les fausses voies : pour se procurer le remblai sur place, on peut creuser des galeries ou des chambres dans le mur ou le toit du gisement aux intervalles réguliers ; donc en arrière de la taille. Et parallèlement à la direction de voie de transport ou d'aérage, on obtient une série de massif de remblais séparés par des espaces libres d'où le nom de fausse voie.

b) Source du remblai de surface

Les sources du remblai de surface sont :

✓ Reprise au terril

Les vieux terrils sont utilisés comme source de remblais, ce dernier est médiocre parce qu'il est formé des délités par des intempéries et donne beaucoup des poussières.

✓ Las carrières

Quelques fois, il faut exploiter au jour des carrières pour produire des remblais nécessaires, le remblayage des grès qui se délitént facilement fournissant les meilleurs remblais, en particulier le remblayage hydraulique. Les remblais hydrauliques sont conçus à l'aide de deux facteurs comme composantes qui sont :

- Les cendres et les scories de centrale thermiques ou des haut-fourneaux ;
- Les rejets des usines de préparation des minerais.

1.4. METHODES D'EXPLOITATION

En ce qui concerne les méthodes d'exploitation souterraine, elles se distinguent en fonction du traitement qu'elles font du vide laissée par l'extraction du minerai. Cependant, dans la pratique, l'exploitation nécessite de varier et de combiner les méthodes présentées ci-dessous, car les dépôts se conforment rarement de façon exacte aux caractéristiques idéales d'application de l'une de ces méthodes.

- ✓ **Méthodes autoportantes** : elles correspondent à celles qui envisagent l'extraction du minerai en laissant la cavité qu'il a occupait vide. Par conséquent, le massif doit être stable d'une manière naturelle (être autosuffisant) ou nécessite peu d'éléments de soutènement :

- Chambre et pilier
- Chambre magasin
- Sous niveaux abattus

- Longs trous
- ✓ **Méthodes supportées** : où le massif creusé nécessite des éléments de support pour la stabilité et / ou rempli avec un matériau exogène : toutes les méthodes de remblayage
- ✓ **Méthodes par foudroyage** : c'est-à-dire que les vides sont remplis par le matériau superposé (minerai, en même temps que l'exploitation, et le stérile, une fois fini). Le foudroyage et le remplissage conséquent de ces cavités se produisent simultanément avec l'extraction du minéral.

1. Chambres et piliers

a) Principe général

La méthode des chambres et piliers consiste à découper le gisement en espaces vides appelés **chambres** ou **galeries d'exploitation**, tout en laissant des masses de minerai intactes appelées **piliers**. Ces piliers soutiennent le toit et empêchent l'effondrement du massif.

Le minerai est d'abord extrait dans les chambres, puis les piliers peuvent soit rester définitivement en place, soit être récupérés partiellement ou totalement à la fin, selon la stabilité du massif et la stratégie de l'exploitant. C'est une méthode très intuitive : on enlève une partie du minerai, mais on conserve assez de matière pour maintenir la voûte.

b) Conditions d'application

Cette méthode convient surtout aux gisements :

- ✓ Horizontaux ou subhorizontaux,
- ✓ De faible à moyenne profondeur,
- ✓ De puissance moyenne à assez importante,
- ✓ Dans des roches compétentes.

On la retrouve souvent dans des dépôts comme le charbon, le sel, la potasse, certains minerais industriels, et parfois des gisements métalliques stratifiés lorsque la géométrie est favorable. Elle est intéressante quand le terrain a une bonne tenue et quand la valeur du minerai justifie une extraction sélective.

c) **Fonctionnement géotechnique**

Le dimensionnement des piliers est essentiel. S'ils sont trop petits, ils risquent d'écraser ou de rompre ; s'ils sont trop grands, beaucoup de minerai reste perdu dans le sous-sol. Le choix du rapport chambre/pilier est donc un compromis entre **sécurité** et **taux de récupération**.

La stabilité dépend de plusieurs facteurs :

- Résistance du minerai et des épontes,
- Profondeur d'exploitation,
- Largeur des chambres,
- Forme et espacement des piliers,
- Présence de failles, fractures ou discontinuités.

d) **Avantages**

- Méthode relativement simple à concevoir et à exploiter.
- Coûts initiaux souvent modérés.
- Bonne sécurité si les piliers sont bien calculés.
- Adaptée à une exploitation progressive.
- Possibilité de mécanisation avec des engins de chargement et de forage.

e) **Inconvénients**

- Une partie du minerai est perdue dans les piliers.
- La récupération globale peut être faible.
- Les risques d'instabilité augmentent avec la profondeur.
- La récupération des piliers en fin d'exploitation peut être dangereuse.
- Dans certains cas, la dilution augmente lors du retrait final.

f) **Applications possibles**

- Mines de charbon.
- Gisements horizontaux de potasse ou de sel.

- Certains gisements de calcaire ou de gypse.
- Dépôts métalliques stratifiés peu profonds et réguliers.

2. Chambre magasin

a. Principe général

La chambre magasin, souvent appelée **shrinkage stoping**, est une méthode où le minerai abattu n'est pas immédiatement évacué. Il est stocké temporairement dans la chambre elle-même. Ce minerai cassé sert à la fois de **support provisoire** et de **plateforme de travail** pour les mineurs ou les équipements.

On abat progressivement le minerai par tranches successives, en retirant seulement une partie du minerai cassé pour conserver un niveau de travail acceptable. À la fin, on vide complètement la chambre.

b. Pourquoi cette méthode est autoportante

Elle est autoportante parce que le minerai abattu joue un rôle de soutien temporaire. Les parois et le toit tiennent pendant la durée de l'exploitation grâce à la masse de minerai fragmenté qui occupe l'espace extrait. Ce n'est donc pas un vide complet comme dans d'autres méthodes sans soutien.

c. Conditions d'application

Elle est surtout adaptée aux gisements :

- À fort pendage,
- Relativement réguliers,
- De puissance faible à moyenne,
- Avec des roches encaissantes assez stables.

Elle est plus difficile à appliquer dans les terrains très fracturés, dans les gisements irréguliers, ou lorsque les épontes risquent de s'effondrer facilement et de contaminer le minerai.

d. Fonctionnement pratique

Le minage se fait depuis des sous-niveaux ou des galeries d'accès. Le minerai est abattu par petites charges, puis laissé dans le chantier. Une partie seulement est retirée pour maintenir

l'espace de travail. Ce mode opératoire crée un certain "tampon" entre la zone de travail et le vide sous-jacent.

Cette méthode demande une bonne discipline d'exploitation, car il faut gérer :

- La hauteur du minerai stocké,
- Le soutirage,
- La ventilation,
- L'accès des travailleurs,
- Le contrôle de la dilution.

e. Avantages

- Peu de manutention immédiate du minerai cassé.
- Le minerai stocké soutient le toit.
- Méthode adaptée aux forts pendages.
- Équipement relativement simple.
- Bonne solution quand on veut limiter les coûts de remblaiement.

f. Inconvénients

- Immobilisation d'une grande quantité de minerai dans le chantier.
- Conditions de travail parfois difficiles.
- Ventilation moins efficace à cause du chantier partiellement rempli.
- Risque de dilution par les épontes.
- Production moins flexible que dans des méthodes plus mécanisées.

g. Applications possibles

- Veines étroites à moyennement épaisses inclinées fortement.
- Certains gisements métalliques filoniens.
- Dépôts où le minerai et les encaissants présentent une bonne cohésion.
- Exploitations qui recherchent un compromis entre simplicité et stabilité.

3. Sous-niveaux abattus

a. Principe général

La méthode des sous-niveaux abattus consiste à diviser verticalement le corps minéralisé en plusieurs niveaux intermédiaires appelés **sous-niveaux**. Depuis ces sous-niveaux, on fore de longs trous dans le minerai, puis on abat celui-ci par volées. Le minerai fragmenté tombe vers les niveaux de récupération situés plus bas.

C'est une méthode de grande productivité, très utilisée dans les gisements épais et inclinés où l'on peut organiser une circulation efficace du minerai. Elle demande une bonne préparation du chantier et une très bonne connaissance géométrique du gisement.

b. Conditions d'application

Elle convient surtout aux gisements :

- Épais,
- Inclinés à raides,
- De grande continuité,
- Dans des roches compétentes.

Elle est moins adaptée aux corps minéralisés très minces, très irréguliers ou fortement fracturés. La tenue du massif rocheux doit être suffisante pour que les sous-niveaux restent stables pendant le forage et l'abattage.

c. Fonctionnement technique

On ouvre d'abord des galeries à différents niveaux. Ensuite, depuis chaque sous-niveau, on fore de grands trous vers le haut ou vers le bas selon le design. Les tirs provoquent l'effondrement contrôlé du minerai par blocs. Le minerai cassé est ensuite récupéré par des points de soutirage.

Cette méthode repose beaucoup sur :

- la précision du forage,
- la qualité du plan de tir,
- la fragmentation obtenue,
- la gestion du soutirage,

- le contrôle de la dilution.

d. Avantages

- Très bonne productivité.
- Forte capacité de production journalière.
- Bon niveau de mécanisation.
- Méthode efficace pour les gros tonnages.
- Convient à une exploitation profonde et structurée.

e. Inconvénients

- Coût de développement initial élevé.
- Nécessite un forage très précis.
- Risque de dilution important si le design est mal contrôlé.
- Demande du personnel qualifié et une bonne planification.
- Pas idéale pour les petits gisements ou les corps irréguliers.

f. Applications possibles

- Gisements massifs et épais.
- Corps minéralisés subverticaux.
- Mines métalliques à forte production.
- Exploitations où la mécanisation est prioritaire.

4. Longs trous

a. Principe général

La méthode des **longs trous** est très proche des sous-niveaux abattus, mais elle met encore davantage l'accent sur le forage de longue portée et sur l'abattage par volées importantes. On fore des trous longs depuis une galerie ou un sous-niveau, puis on réalise des tirs successifs pour faire tomber de grandes quantités de minerai.

On peut la considérer comme une méthode très mécanisée d'exploitation en masse, adaptée aux gisements bien connus géométriquement et mécaniquement.

b. Conditions d'application

Elle est adaptée aux gisements :

- de grande épaisseur ou de puissance moyenne,
- inclinés à subverticaux,
- avec une roche compétente,
- où la précision du forage peut être garantie.

Cette méthode est très sensible aux erreurs de forage. Si les trous dévient, la dilution augmente rapidement et la récupération peut diminuer. Elle demande donc un contrôle géotechnique et topographique rigoureux.

c. Fonctionnement pratique

Le forage des trous longs peut se faire avec des jumbos ou des équipements spécialisés. Le tir est ensuite organisé pour fragmenter le minerai par blocs contrôlés. Le minerai tombe vers les points de collecte situés en dessous, d'où il est chargé et transporté vers la surface.

Le succès de la méthode dépend de :

- L'orientation correcte des trous,
- La maîtrise des charges explosives,
- La séquence d'allumage,
- La stabilité des murs,
- La récupération du minerai abattu.

d. Avantages

- Très fort rendement.
- Bonne adaptation à la mécanisation.
- Moins de main-d'œuvre exposée directement au front.
- Convient à l'exploitation de gros volumes.
- Peut donner une bonne rentabilité si le gisement est régulier.

e. Inconvénients

- Coûts d'équipement élevés.
- Forte dépendance à la précision du forage.
- Dilution possible si le tir déborde sur les stériles.
- Méthode moins flexible en terrain irrégulier.
- Besoin d'un encadrement technique solide.

f. Applications possibles

- Mines de cuivre, fer, or ou autres métaux dans des corps épais.
- Gisements profonds et bien structurés.
- Exploitations industrielles à haut tonnage.
- Corps minéralisés permettant de grands volumes d'abattage.

5. Comparaison logique entre les quatre méthodes

Les quatre méthodes sont autoportantes, mais elles ne répondent pas aux mêmes conditions.

- **Chambres et piliers** : mieux pour les gisements plats ou peu inclinés.
- **Chambre magasin** : mieux pour les gisements très pentus.
- **Sous-niveaux abattus** : mieux pour les gisements épais et très productifs.
- **Longs trous** : mieux pour les exploitations mécanisées à grande échelle.

En d'autres termes, le choix dépend surtout de la géométrie du gisement et du comportement mécanique du massif. Un gisement plat, stable et relativement régulier ne sera pas exploité comme un corps massif, profond et incliné.

6. Critères de choix

Pour choisir une méthode autoportante, on regarde généralement :

- La forme du gisement.
- Le pendage.
- L'épaisseur.

- La profondeur.
- La résistance du minerai et des encaissants.
- Le niveau de fracturation.
- La teneur et la valeur du minerai.
- Le tonnage recherché.
- Le coût acceptable.
- Le niveau de sécurité et de mécanisation souhaité.

Plus le gisement est régulier et compétent, plus on peut aller vers des méthodes mécanisées comme les sous-niveaux abattus ou les longs trous. Plus le gisement est simple, plat et stable, plus les chambres et piliers sont intéressantes. Plus le gisement est très incliné, plus la chambre magasin peut devenir pertinente.

On peut résumer ainsi :

- **Chambres et piliers** = on laisse des piliers pour tenir le toit.
- **Chambre magasin** = on garde le minerai abattu dans la chambre pour soutenir temporairement.
- **Sous-niveaux abattus** = on exploite en tranches successives à partir de sous-niveaux.
- **Longs trous** = on fore de longues charges pour abattre de gros volumes de minerai.

I.5. CONCLUSION PARTIELLE

Au terme de ce premier chapitre, il ressort que l'exploitation minière souterraine constitue une activité complexe qui nécessite une parfaite maîtrise des paramètres géologiques, géomécaniques et techniques afin de garantir la sécurité des travailleurs et la rentabilité des opérations minières. L'analyse des différentes méthodes d'exploitation a montré que leur choix dépend essentiellement des caractéristiques du gisement, de la qualité du massif rocheux ainsi que des objectifs de production poursuivis. Elle a également mis en évidence que la stabilité des excavations représente un enjeu majeur dans les mines souterraines, justifiant ainsi le recours aux techniques de remblayage. Les notions théoriques développées dans ce chapitre constituent donc le fondement scientifique indispensable pour l'étude des solutions de

remblayage qui sera abordée dans les chapitres suivants, en vue de déterminer le remblai le plus approprié aux conditions d'exploitation de la mine de Kamoya.

CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTERATURE

II.1. INTRODUCTION

Cette revue de la littérature se concentre sur l'analyse comparative des remblais rocheux, hydrauliques et en pâte cimentée, en mettant l'accent sur les recherches pertinentes réalisées dans des environnements miniers variés. L'objectif est de tirer des enseignements applicables à la mine de Kamoya.

II.2. GENERALITES SUR LES REMBLAIS

De plus en plus, les exploitations minières utilisent une partie de leurs rejets miniers solides pour le remblayage des ouvertures souterraines. Certains remblais se composent de roches stériles, alors que d'autres contiennent surtout des rejets de concentrateur, mélangés ou non un agent liant comme du ciment portland seul ou combiné avec des scories.

Il est utilisé pour l'optimisation des exploitations minières comme support des excavations souterraines, assurant ainsi la stabilité des chantiers. Il permet aussi l'ouverture sécuritaire de nouvelles chambres et d'enfouir une quantité importante des rejets miniers. Il existe plusieurs types de remblai dans l'industrie minière, leurs caractéristiques dépendent de la nature des matériaux utilisés. Les plus connus sont :

- Les remblais rocheux ;
- Les remblais hydrauliques ;
- Les remblais en pâte cimentée ;
- Les remblais mixtes.

II.2.1. Remblais Rocheux

Les remblais rocheux sont souvent utilisés pour leur résistance mécanique. **Harris et al. (2015)** ont étudié l'impact de la composition des remblais rocheux sur la stabilité des excavations, en se concentrant sur les propriétés mécaniques essentielles. Leur méthodologie incluait des essais de laboratoire et des modélisations numériques, et leur travail a été réalisé dans des mines d'or en Australie. De même, **Krause et al. (2016)** ont analysé le comportement des remblais rocheux sous des conditions de charge dynamique, avec une investigation menée dans des mines de charbon en Allemagne. Leur recherche a révélé des insights importants sur la réponse des remblais rocheux aux variations de charge, ce qui est essentiel pour la planification dans des environnements souterrains.

Le remblai rocheux se réfère à des agrégats grossiers de roche utilisés par l'industrie minière à des fins de remblayage des excavations souterraines (Yu & Counter). Les stériles sont constitués de roches excavées lors du développement des chantiers miniers souterrains pour atteindre le minerai. Ils sont constitués généralement de matériaux grossiers hétérogènes.

Le remblai rocheux est utilisé lorsqu'on veut réduire la quantité des stériles en surface ou quand on souhaite obtenir des résistances élevées. L'ajout de liant est optionnel et peut se faire avant, pendant ou après le dépôt des roches stériles dans le chantier. Le liant utilisé dans ce type de remblai représente 5 à 6% de la masse de stériles secs et est utilisé sous forme de coulis ayant un pourcentage solide variant entre 50 et 60% (rapport E/C variant entre 0,5 et 0,6). C'est un remblai facile à préparer, ne nécessite pas de barricades et ne génère aucune eau de drainage. Cependant, sa préparation en surface, son concassage et son transport sous terre nécessitent des coûts importants (Benzaazoua et al., 2005; Belem, 2013).

Le remblai rocheux est plus résistant que les remblais hydraulique et en pâte pour les mêmes proportions de liant (Chou, 2012; Grice, 1998), cependant la mise en oeuvre demande plus de moyens. L'un des problèmes avec le remblai rocheux est la ségrégation des particules; ce qui réduit la résistance dans certains endroits du chantier (Belem, 2013).

II.2.2. Remblais Hydrauliques

Les remblais hydrauliques, qui présentent des caractéristiques spécifiques de durcissement, sont également largement étudiés. **Martinez et Ceballos (2017)** se sont penchés sur le durcissement de ces remblais en conditions souterraines, en identifiant les facteurs influençant leur résistance. Leur recherche, menée dans des mines de cuivre au Chili, a utilisé des tests de durabilité pour évaluer les propriétés mécaniques au fil du temps. En parallèle, **Santos et Lima (2018)** ont examiné la performance des remblais hydrauliques face à des conditions humides, avec une investigation effectuée dans des mines de minerai de fer au Brésil. Leur étude a démontré l'importance de formulations spécifiques pour garantir l'efficacité des remblais dans des environnements souterrains.

Ce remblais est constitué de rejets de concentrateur classifiés par hydrocyclonage (aussi appelé deshlamage), d'eau et parfois d'un agent liant, pour un pourcentage solide massique compris entre 60 et 70% de la masse de résidus secs (Grice, 1998; Hassani & Archibald, 1998). Pour favoriser le drainage du remblai, la proportion de superfines ($d < 10$) doit être la plus faible possible dans les résidus.

Thomas & Holtam (1989) ont classifié les remblais hydrauliques en fonction du pourcentage de particules superfines présents dans les rejets de concentrateur (Tableau ci-dessous).

Tableau II. 1 Classification des remblais hydraulique en fonction du pourcentage de fines

% super fines (d<10um)	Classification
0-10	Très grossier
10-20	Grossier
20-30	Moyen
30-40	Fin
40-50	Très fin
>50	Extrêmement fin

Le remblai hydraulique est transporté par gravité à travers les trous de forage et les pipelines vers les chantiers ouverts à remblayer. Le surplus d'eau dans les chantiers doit être évacué par pompage vers la surface ou recyclée ailleurs dans la mine. C'est un remblai qui est facile à préparer, à transporter et son coût de production est faible. Il y a cependant deux inconvénients majeurs dans son utilisation (Grice, 1998; Belem, 2013).

Le premier est lié aux barricades qui doivent être construites pour retenir le remblai et faciliter le drainage de l'eau en excès. Le second est relatif à la gestion de l'eau dans le chantier remblayé. Si l'eau en excès n'est pas drainée adéquatement et pompée, cela pourrait entraîner des défaillances au niveau des barricades entraînant ainsi le déversement du remblai dans les galeries de soutirage. Ce qui pourrait mettre en cause la sécurité des travailleurs et des équipements. La rupture des barricades est un problème de sécurité grave qui nécessite une bonne maîtrise pour assurer la santé et la sécurité des travailleurs et la protection des équipements.

Ainsi, pour réduire les risques liés à la gestion des barricades et obtenir de meilleures résistances mécaniques, les industriels et les chercheurs ont conçu le remblai en pâte cimenté.

II. 2.3. Remblais en Pâte Cimentée

Les remblais en pâte cimentée sont particulièrement intéressants en raison de leur cohésion élevée. Li et Zhang (2018) ont évalué l'impact des conditions environnementales sur ces remblais, cherchant à optimiser leur cohésion et leur durabilité. Leur recherche, réalisée dans

des mines de nickel en Chine, a impliqué des tests en laboratoire sous diverses conditions. Patel et al. (2020) ont, quant à eux, analysé la durabilité des remblais en pâte cimentée dans des environnements extrêmes, en se basant sur des expérimentations menées dans des mines de diamant en Afrique du Sud. Leur étude a permis de mieux comprendre la résistance de ces matériaux aux variations climatiques.

Le remblai en pâte a été développé à l'origine par Preussag en Allemagne et utilisé à la mine Bad Grund à la fin des années 1970 (Grice, 1998; Belem, 2013). Le rôle premier du remblai en pâte cimenté est de jouer au support de terrain afin de maintenir la stabilité structurale des ouvertures pendant l'exploitation minière (Belem & Benzaazoua, 2008)

Du fait des nombreux avantages (stabilité des chantiers souterrains, sécurité des travailleurs, moyen de stockage des rejets) qu'il procure, le RPC a été rapidement adopté par les entreprises minières et est devenu par la suite le remblai le plus utilisé (Benzaazoua et al., 2005a).

Malgré ces avantages, le principal problème reste le coût de sa préparation qui est lié au prix élevé des liants. Le liant hydraulique est utilisé dans les remblais en pâte généralement avec un pourcentage de 3 à 7% de la masse de résidus secs (Belem et al., 2000; Benzaazoua et al., 2000, 2002, 2004; Nasir & Fall, 2010). Il représente le principal coût du remblayage, soit entre 75 et 80% (Grice, 1998; Belem et al., 2000; Belem & Benzaazoua, 2008b).

Ainsi, pour l'optimisation du coût de remblayage, les chercheurs et industriels étudient comment réduire le pourcentage de liant utilisé. De telles études se font généralement au laboratoire, en cherchant la recette optimale, qui permet d'avoir la résistance requise avec moins de liant possible.

II.2.4. Remblais Mixtes

De nouvelles techniques de remblayage ont permis ces dernières années d'améliorer la production des entreprises minières (Annor, 1999).

L'introduction des remblais miniers en pâte cimentés a considérablement modifié les techniques d'exploitation. Actuellement, beaucoup d'entreprises (mines et consultants) et des chercheurs travaillent sur comment trouver un remblai plus résistant que les remblais en pâte. Ces études s'orientent vers la fabrication de remblais mixtes, un mélange d'au moins deux types de granulats. Les remblais mixtes (hybrides ou composites) peuvent être définis comme étant tout mélange de résidus et/ou de stériles et d'autres fillers comme le sable, les déchets

métallurgiques, les fibres lignocellulosiques (fibres de bois, écores, boue papetière), de liant et d'eau.

En ajoutant des stériles concassés dans le remblai hydraulique ou le remblai en pâte cimenté, ou en mettant des résidus (ou du sable) dans des remblais rocheux, plusieurs types de remblais mixtes peuvent être produits (Dorricott & Grice, 2002).

L'utilisation des remblais composites est bénéfique pour l'industrie minière car ils permettent d'éviter la ségrégation dans les remblais rocheux et d'augmenter les particules grossières dans les remblais en pâte ou hydraulique. Ils sont souvent utilisés pour augmenter la résistance du matériau cimentaires. Les remblais composites les plus connus sont :

- ✓ Remblai rocheux avec ajout de sable ou de résidus miniers ;
- ✓ Remblai hydraulique avec ajout de granulats (Cemented Aggregate Fill ou CAF)
- ✓ Remblai hydraulique ou en pâte contenant du sable ;
- ✓ Remblai en pâte contenant des stériles concassés (Rocky Paste Fill ou RPF, Paste Aggregate Fill ou PAF).

Des études sont menées à l'Institut de Recherche en Mines et en Environnement (UQAT) pour préparer un remblai en pâte avec des fibres lignocellulosiques ou des nano silicates (Koohestani, 2016).

Thompson et al. (2019) ont exploré l'efficacité des remblais mixtes par rapport aux remblais simples, en évaluant leur impact sur la stabilité dans des mines de plomb-zinc au Canada. Leur méthodologie combinait analyses expérimentales et modélisations numériques. **Nguyen et al. (2021)** ont également examiné les interactions entre différents types de remblais en milieu souterrain, avec une investigation réalisée dans des mines d'or en Nouvelle-Zélande. Leur étude a mis en évidence les synergies et défis associés aux remblais mixtes, offrant des perspectives intéressantes pour leur application en milieu minier.

A. Remblai rocheux avec ajout de sable ou de résidus miniers

Le remblai rocheux est fait de roches stériles provenant de la mine, concassés et envoyés sous terre. C'est un remblai plus résistant que le remblai en pâte. Cependant, avec les vides dans le matériau et des problèmes de ségrégation, il est moins utilisé que le RPC. Pour réduire

la porosité de ce type de remblai, du sable ou des résidus miniers peuvent être utilisés. Ces remblais sont connus sous les noms de :

Consolidated Sand Rockfill (CSRf) : est une combinaison de remblai rocheux, Cemented Rock Fill (CRF) avec des quantités variables de sable, généralement de 5 à 10% massique (Yu, 1989). Pour des teneurs en ciment similaires à celle des remblais rocheux, la pulpe de ciment/sable peut être introduit en même temps que le placement des stériles.

Consolidated Sand Waste Fill (CSWF) : avec cette forme de remblai, les stériles sont laissés en place dans les chantiers où le minerai est extrait et consolidé en versant un mélange de ciment et de sable sur le dessus pour percoler à travers le tas de roche.

Le rôle de la pulpe de ciment/sable est de consolider les stériles et d'améliorer le support de terrain tout en réduisant la dilution du minerai. La teneur globale en ciment est approximativement de 5%. L'effet d'ajouter du sable dans le remblai rocheux a été étudié à la mine Kidd Creek par Yu et Counter (1983).

Ils démontrent qu'en ajoutant 5% de sable dans le remblai rocheux, on réduisait significativement la ségrégation des agrégats et la résistance à la compression augmentait de 40%. Ce remblai mixte est un Consolidated Sand Rockfill (CSRf). Kintzel (2005) a étudié un mélange de stériles concassés et de sable, utilisé dans un chantier primaire à la mine Callie. Le sable représente 50% massique des stériles et le liant était de 3,5%.

Ce remblai mixte a permis d'avoir une résistance à la compression de 2,5 MPa à 56 jours.

L'ajout de résidus dans le remblai rocheux est bénéfique, cependant une quantité trop élevée peut affecter sa résistance. Wang & Villaescusa (2000) ont étudié l'évolution de la résistance en compression triaxiale du remblai rocheux ($d_{max} = 20 \text{ mm}$) en fonction du pourcentage de résidus ajoutés. Pour le même pourcentage de liant utilisé (4%), l'optimum était de 10% de résidus. Lorsque le remblai rocheux ne contient pas de résidus ou un pourcentage supérieur à 10%, sa résistance en compression triaxiale était faible. En effet, quand il y'a beaucoup de fines, la surface spécifique du matériau augmente, donc sa demande en ciment pour une bonne cohésion est plus élevée.

B. Remblais hydrauliques ou en pâte contenant du sable

Lorsqu'on a des résidus de granulométrie fine, une quantité de sable peut être ajoutée pour augmenter la particule plus grossière. Cette pratique permet d'accroître la résistance mécanique du remblai (Landriault, 1995; Amaratunga & Yaschyshyn, 1997; Atmor, 1999; Helms, 1988). Ross-Watt (1989) a rapporté qu'à *Black Mountain Mine* (Afrique du Sud) du sable et des résidus ont été utilisés pour préparer un remblai hydraulique dans les proportions 50%-50% pour un pourcentage solide final entre 70 et 74%. Le liant représentait environ 7,5% massique des résidus et du sable secs. Ce remblai mixte a permis d'avoir une résistance mécanique de 700 kPa à 14 jours de cure.

Dans une autre mine, à O'okiep Copper Company (Afrique du Sud), un mélange de résidus dans un rapport 3, 5 : 1 avec un pourcentage liant de 6, 5 à 7% a été utilisé pour remblayer un chantier secondaire (Ross-Watt, 1989). Ce remblai ayant un pourcentage solide de 75% a donné une résistance de 850 kPa à 90 jours.

C. Remblai hydraulique ou en pâte avec granulats

Les remblais mixtes hydraulique-granulats ou RPC-granulats sont en plein essor depuis quelques années (Swan, 1985; Senyur & Erer, 1989; Stone, 1993; Armor, 1999; Wang & Villaescusa, 2000; Dorricott & Grice, 2002; O'Toole, 2004; Potvin et al., 2005). Le premier véritable remblai hybride de ce type a été testé à la mine Mont Isa (Leahy & Cowling, 1978) et il s'agissait de l'ajout de roches concassées de moins de 25 mm de taille au remblai hydraulique (résidus classifiés) à des proportions pouvant aller jusqu'à 40% massique et appelé Cemented Aggregate Fill (CAF).

Le CAF est défini comme étant un mélange de stériles concassés transportés sous terre et mélangé avec du remblai hydraulique (Potvin et al., 2005). Du fait de ses avantages, il a été régulièrement employé dans les mines en roche dure, surtout en Australie (Swan, 1985; Senyur & Erer, 1989; Armor, 1999; Reschke, 2000; Wang & Villaescusa, 2000; O'Toole, 2004; Kintzel, 2005). Grice (1998) a rapporté qu'à la mine Mount Isa des stériles concassés à un diamètre inférieur à 75 mm ont été ajoutés dans du remblai hydraulique.

Le remblai final était composé de 3% de liant, 30% de remblai hydraulique et 66% de remblai rocheux. Ce remblai composite a permis d'avoir une résistance à 28 jours de 1,5 MPa et d'économiser près de 2% de liant en masse. Dans son étude, Arioglu (1983) a utilisé un mélange composé de 60% de marbre concassé ($d_{max} = 45$ mm) et 40% de résidus. Il démontre

que l'ajout de stériles concassés (ratios stériles: ciment de 5: 1, 10: **1** et 20: **1**) dans du remblai hydraulique pouvait augmenter sa résistance en compression entre 200 et >600% (ratio stériles : ciment de 5: **1** 0). Badwin et Grice (2000) ont rapporté qu'à la mine d'Olympie Dam, situé au Nord de l'Australie, un remblai mixte, composé de roches stériles, de résidus miniers et/ou du sable, du ciment, de la flyash et d'eau a été utilisé. Les proportions étaient les suivantes : 60-65% de granulats, 20-22% de résidus (ou sable), 2,5% de ciment et 5% de flyash. Le mélange final avait un slump compris entre 150 et 180 mm. Ce type de remblai, nommé Rocky paste fall (RPF) avait été préparé en surface avant son convoyage sous terre.

La résistance mécanique obtenue du RPF était comprise entre 0,5 et 5 MPa.

Le Rocky pastefill a été aussi utilisé à la mine Mont Isa en 1996 (Kuganathan & Sheppard, 2001; Potvin & Fourie, 2005). Ce RPF est fait de stériles concassés classifiés (60-75%) et du remblai hydraulique de pourcentage solide de 72% (25-40%). Pour ce remblai mixte, 1,5% de ciment Portland (GU) et 3% de Slag ont été utilisés comme liant. Le mélange permet d'obtenir une pâte homogène et aucune ségrégation n'était notée dans le chantier remblayé. Les granulats et les résidus fins favorisent une meilleure fluidité du remblai.

Pour un RPF composé de 75% de stériles concassés et 25% de remblai hydraulique, une résistance mécanique de 1,77 MPa a été obtenue à 28 jours. Des travaux réalisés à l'URSTM ont montré un effet bénéfique de l'ajout des stériles dans le remblai en pâte. Des stériles miniers concassés à 12,7 mm, représentant 45% de la masse totale des stériles et résidus ont été utilisés pour fabriquer du remblai mixte résidus/stériles concassés. Les résultats montrent le développement de fortes résistances malgré de très faibles pourcentages de liant. En effet, la résistance à la compression était supérieure à 1200 kPa après 28 jours de cure avec 2,5% de liant (GU-Slag). L'ajout de stériles a augmenté l'UCS de près 300% par rapport au mélange témoin (résidus seulement) à 180 jours de cure.

Dans une autre étude, des stériles concassés à un diamètre maximal de 10 mm, représentant 17,5% de la masse des résidus et stériles secs ont été utilisés. Le liant est composé de 90% de slag et 10% de GU, correspondant à 4,5% de la masse combinée de résidus et stériles secs. Ce remblai mixte avec un pourcentage solide de 77% a permis d'atteindre des résistances mécaniques de 1,95 MPa à 28 jours et 2,45 MPa à 56 jours de cure.

Plusieurs études ont montré que la résistance des mélanges contenant des granulats (CAF, RPF, béton) est influencée par plusieurs facteurs (Wu et al. 2001; Donza et al, 2002; Quiroga & Fowler, 2003; Ke et al., 2009; Meddah et al., 2010). Parmi ceux-ci on peut citer: la granulométrie des rejets utilisés, la forme et la taille des granulats, la ségrégation des grosses particules et la résistance des granulats. Il est important de connaître les paramètres qui affectent la résistance mécanique des PAF, pour un bon design, une meilleure évaluation économique et un bon contrôle de qualité. Cela permettra aussi d'optimiser sa fabrication.

II.4. CONCLUSION PARTIELLE

Cette revue de la littérature met en lumière l'importance d'une approche comparative des types de remblais dans le contexte de la mine souterraine. Les études examinées soulignent la nécessité de choisir des matériaux adaptés pour garantir la stabilité des ouvrages souterrains. Les connaissances acquises à partir de recherches variées dans des contextes miniers différents peuvent servir de base pour optimiser la sécurité et la durabilité des infrastructures à Kamoya. Une approche intégrée, prenant en compte les spécificités géologiques et hydrologiques de la région, est essentielle pour assurer la réussite des opérations minières.

CHAPITRES III. MATERIEL, METHODES ET CARACTERISATION DU REMBLAI

III.1. INTRODUCTION

Le présent chapitre décrit les matériels et les méthodes utilisés pour réaliser cette étude, ainsi que la caractérisation des matériaux de remblayage employés à la mine de Kamoya. Il présente les différentes étapes de préparation des échantillons, les équipements et les essais réalisés afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques du remblai. Les résultats obtenus constituent la base de l'évaluation technique et économique du remblai optimal pour assurer la stabilité et la sécurité des excavations souterraines.

III.2. METHODE ET MATERIEL UTILISE

III.2.1. Matériaux utilisés

Les matériaux choisis pour le remblayage en mine souterraine correspondent principalement aux composés suivants :

- ✓ Ciment (type GU et/ou addition de laitier selon formulations spécifiques) ;
- ✓ Agrégats granulaires répartis selon les fractions granulométriques adaptées ;
- ✓ Eau, pour la préparation du mortier.

A. Composition du liant

La composition chimique du liant, composé principalement de ciment Portland (GU) et éventuellement de laitier (Slag), est primordiale pour assurer la résistance et la durabilité du remblai. La caractérisation élémentaire des liants utilisés est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 1 Composition chimique du liant utilisé

liant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅
GU	19,3	4,99	2,97	64,3	2,1	0,27	0,50	0,27	0,26	0,12	0,01	0,03
Slag	35,6	10,5	0,65	37,5	11,9	0,46	0,51	0,98	0,93	0,50	0,01	0,01
GU-Slag	32,34	9,40	1,11	42,86	9,94	0,42	0,51	0,84	0,84	0,42	0,01	0,01

La teneur en ciment est fixée à 6% du poids total du mélange afin d'atteindre une résistance à la compression uniaxiale d'au moins 1,2 MPa, conformément aux exigences de stabilité pour les chambres a remblayées.

III.2.2. Description du matériel utilisé

Pour la réalisation du besoin en remblayage en mine souterraine plusieurs équipements sont mis en œuvre pour l'obtention d'un bon remblai. Le matériel principal comprend :

- ✓ **Malaxeur** : équipement utilisé pour homogénéiser les composants du mélange (ciment, agrégats, et eau) afin d'obtenir un remblai de qualité optimale.
- ✓ **Presse électromécanique** : utilisée en laboratoire pour effectuer les essais de compression uniaxiale sur des échantillons de remblai, permettant la détermination des caractéristiques mécaniques (résistance à la compression).
- ✓ **Systèmes de pesée** : répartis dans les réservoirs de ciment, granulats et eau, ces dispositifs permettent un dosage rigoureux et précis des matières premières entrant dans le mélange.
- ✓ **Réservoirs de stockage** : ils sont équipés de dispositifs de pesée connectés au système de dosage.
- ✓ **Système de pompage** : plusieurs pompes utilisés pour l'eau de mélange et pour remblayer cas du remblayage hydraulique.

III.2.2.1. Circuit de concassage

Le circuit de concassage utilisé pour la préparation des remblais comprend plusieurs étapes, visant à obtenir une distribution granulométrique conforme aux spécifications techniques. Le processus comprend :

- Réception des matériaux bruts ;
- Concassage primaire, secondaire et tertiaire ;
- Cribles et tamisage pour séparer les fractions granulaires ;
- Stockage des agrégats selon la granulométrie.

Ce circuit permet d'optimiser la qualité et la taille des granules pour assurer la résistance mécanique et la compacité du remblai.

Ce circuit combine ainsi un concassage primaire robuste ; un crible précis et Un concassage secondaire performant pour obtenir un produit final de qualité.

La quantité de stérile nécessaire au remblayage est déterminée par le volume de l'espace à combler, pour déterminer la quantité des déblais extraits dans les massifs rocheux vierges, il faut tenir compte de son foisonnement. D'autre, le volume de remblayage est habituellement inférieur à l'espace épuisé. Par conséquent, quand on doit remblayer un espace épuisé, la

quantité de stériles nécessaires est inférieure à la quantité de minerai extrait du fait que le coefficient de foisonnement intervient et les autres facteurs ci-haut.

Le coefficient de foisonnement est donné par la formule suivante :

$$f = \frac{v}{v'} \quad (\text{III.1})$$

Avec v: volume initiale en place

v' : volume après découpage ou volume abattus

Ce coefficient dépend de la nature des roches et de leurs granulométries : ci-après, les valeurs du coefficient de quelques roches sont de l'ordre (PAQUET, 1997) :

- Sables fins coulants : 1,08
- Sables graviers : 1,08-1,2
- Limons sableux : 1,20-1,25
- Argiles compactés : 1,25-1,30
- Roches dures (calcaire, granites, ...) : 1,30-1,50

Si un volume de remblais est soumis à une pression suffisante, les roches foisonnées reviennent facilement à leur volume initial ; Ce phénomène est caractérisé par le coefficient de compacité ce qui est l'inverse du coefficient de foisonnement.

Dans les travaux miniers, les remblais sont comprimés sous l'action des roches du toit et celle de leurs propres poids par conséquent, le remblai supporte les tassements et la grandeur du tassement est fonction des caractères des matériaux de remblayage, de puissance du gisement, de l'angle de pendage, du mode de remblayage, de l'épaisseur du gisement et du temps.

- La perméabilité du remblai dépend également de la granulation. L'écoulement de l'eau et son drainage en dépendent ; du point de vue de la perméabilité ; les matériaux sont classés selon leur coefficient de perméabilité.

Ainsi on aura :

- Pour $K < 10^{-5}$: matériau imperméable ;
- Pour $10^{-5} < K < 10^{-1}$: matériau moyennement perméable ;
- Pour $K > 10^{-1}$: matériau de bonne perméabilité.

Le coefficient de perméabilité est fonction de la granulométrie et de la porosité n défini comme (STASSEN, 1982).

$$n = \frac{V_w + V_a}{V_t} * 100(\%) \quad (III.2)$$

Avec : V_e : volume d'eau

V_a : volume d'air

V_t : volume total

On définit aussi l'indice des vides 'e' et le degré de saturation « S_r » par :

$$e = \frac{V_w + V_a}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \quad (III.3)$$

$$S_r = \frac{V_a}{V_r} = \frac{V_w}{V_w + V_a} \quad (III.4)$$

Où V_s est le volume du solide

La perméabilité permet la dissipation rapide de la teneur initiale en eau du remblai.

La décantation des solides commence avec l'injection de la pulpe. Avant que la chambre ne se remplisse, il y a déjà une bonne quantité de solides décantés. On détermine expérimentalement la vitesse de décantation du remblai utilisé. Le phénomène de décantation permet d'obtenir 3 points suivants :

- Une solution claire au-dessus ;
- Une solution trouble au milieu ;
- Un amas de solides en bas.

Le temps de décantation T_d est calculé par la formule :

$$T_d = \frac{H_r}{V_d} (\text{Sec}) \quad (III.5)$$

Où

- H_r : Hauteur de la chambre à remblayer

- V_d : vitesse de décantation

III.2.2.2. Usine de traitement

L'usine de traitement comprend les installations nécessaires pour le dosage, le mélange et la préparation finale du remblai. Elle est équipée de :

- Réservoirs et trémies pour les différents matériaux avec système de pesée intégrée ;
- Malaxeur central garantissant une homogénéisation parfaite des ingrédients ;

- Système de transfert par bande transporteuse ; par pompage ou par camion benne permettant l'acheminement rapide du mélange vers les chantiers de remblayage.

III.3. CARACTERISATION DU REMBLAI

III.3.1. Plan d'échantillonnage et préparation d'échantillon

Pour réaliser un échantillon d'essai de résistance en compression uniaxiale (essai UCS) à partir d'un remblai, on prélève une portion représentative au malaxeur (mixeur) du remblai, puis cette portion est moulée dans un moule spécifique. Ce moule est généralement en acier ou en fonte, propre et légèrement huilé pour éviter l'adhérence du matériau. Le remplissage du moule se fait souvent en plusieurs couches, compactées si nécessaire, pour assurer une bonne homogénéité de l'échantillon.

Cette méthode de prélèvement directement au malaxeur assure que le matériau contenu dans l'échantillon est bien représentatif du remblai tel qu'il sera utilisé en œuvre, ce qui est crucial pour obtenir des résultats pertinents lors de l'essai de compression uniaxiale.

Ainsi, la séquence est la suivante :

- ✓ Prélèvement au malaxeur du remblai remué et homogénéisé.
- ✓ Remplissage du moule en couches éventuelles, compacté suivant les besoins.
- ✓ Démoulage et conditionnement pour cure si nécessaire.
- ✓ Réalisation de l'essai UCS sur l'échantillon moulé.

Pour remblai mixte la compression uniaxial peut être aussi déterminé par la formule la plus couramment utilisée est celle qui est basée sur le **rapport eau/ciment** (W/C) et la proportion de ciment, car ces paramètres sont cruciaux pour la résistance et la performance des remblais hydrauliques.

La formule qui ressort souvent pour les remblais hydrauliques est la suivante :

$$UCS = a * \left(\frac{c}{w}\right) b * tc \quad (III. 6)$$

Avec

- $b = 0.5$: influence de la teneur en ciment (ACI 207.3R-94, *Guide for Practices on Cemented aggregates fill*, ACI)

- $c = 0.3$: influence du temps de cure (*SME Mining Engineering Handbook*, 3rd Edition)
- $C = 6\% = 0.06$ (teneur en ciment)
- W : rapport eau/ciment)
- $t = 28$ jours (temps de cure)

Pour déterminer le nombre des chambres à ouvrir mensuellement

$$Vf = \frac{P}{df} \quad (III. 7)$$

Le besoin en matériaux de remblayage peut alors être déterminé comme suit :

$$Qr = \frac{Kr.Vefftot.(1+\tau\rho).(1+\lambda)}{K} \quad (III. 8)$$

Avec :

- ✓ λ = coefficient de tassement du remblai qui est de 0,15 pour l'argile et 0,05 pour les taillings à cause de leur faible granulométrie.
- ✓ P = coefficient tenant compte des pertes de remblai entraîné par l'eau (il vaut 0,15 pour l'argile et 0,02 pour les taillings)
- ✓ K = coefficient de foisonnement du remblai ($K = 1,05$ pour le sable et les taillings et 1,50 pour les roches de dureté moyenne)
- ✓ Kr = coefficient tenant compte de la présence des cheminées. Nous n'en tiendrons pas compte dans nos calculs.

Calcul de la densité pulpe

$$\%Solide = \frac{ds(dp-1)}{dp(ds-1)} \times 100 \quad (III. 9)$$

III.4. CONCLUSION PARTIELLE

Au terme de ce troisième chapitre, il ressort que la quantification des matériaux de remblayage ainsi que la caractérisation du remblai constituent des étapes déterminantes dans la préparation technique d'une exploitation souterraine. Les calculs effectués ont permis d'estimer les volumes à remblayer, d'identifier les besoins en matériaux et de préciser les paramètres physiques et mécaniques qui influencent le comportement du remblai. L'analyse a également montré que la granulométrie, la porosité, la perméabilité, le foisonnement et la teneur en eau jouent un rôle essentiel dans la qualité finale du remblai et dans sa capacité à assurer la stabilité des excavations. En somme, ce chapitre fournit les bases techniques nécessaires pour aborder, dans les chapitres suivants, l'évaluation technico-économique du choix du remblai optimal adapté aux conditions de la mine de Kamoya.

CHAPITRE IV. ÉTUDE TECHNICO-ECONOMIQUE DU CHOIX DU REMBLAI OPTIMAL

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude technico-économique du choix du remblai optimal pour la mine de Kamoya. Après avoir présenté les fondements théoriques, les types de remblais et les méthodes de quantification des matériaux, il s'agit maintenant d'évaluer les différentes solutions de remblayage selon leurs performances techniques, leurs exigences de mise en œuvre et leurs coûts respectifs. L'objectif est de déterminer la formule la plus avantageuse, capable d'assurer à la fois la stabilité des excavations souterraines, la sécurité des travailleurs et une utilisation rationnelle des ressources disponibles. Ce chapitre s'appuie donc sur une démarche comparative et analytique afin de mettre en évidence le remblai offrant le meilleur compromis entre résistance mécanique, efficacité opérationnelle et rentabilité économique.

IV.2. QUANTIFICATION DES MATERIAUX

IV.2.1. Remblayage hydraulique

IV.2.1.1. Détermination des besoins en matériaux de remblayage

Les besoins en matériaux de remblayage se calculent à partir du nombre de chambres à ouvrir et à remblayer chaque mois, lequel est déduit du tonnage mensuel excavé. Connaître la production mensuelle (tonnage excavé) permet de déterminer combien de chambres doivent être ouvertes et remblayées par mois, et donc le volume de matériaux de remblai nécessaire.

IV.2.1.2. Détermination de la production mensuelle

Pour établir la production mensuelle de la mine, nous avons pris en compte plusieurs paramètres clés :

- ✓ La capacité des bennes : chaque benne a une capacité de 45 tonnes
- ✓ Structure des shifts : la mine fonctionne avec 2 shifts
- ✓ Utilisation des bennes : chaque shift utilise 5 bennes
- ✓ Voyage par benne : chaque benne réalise 8 voyages /shift

Calcul

Production d'une benne par shift : $45 \text{ Tonnes} \times 8 \text{ voyages} = 360 \text{ Tonnes}$

Production totale par shift : $360 \times 5 \text{ bennes} = 1\,800 \text{ Tonnes}$

Production journalière : $1\,800 \times 2 \text{ shifts} = 3\,600 \text{ tonnes}$

Production mensuelle : $3\,600 \text{ Tonnes} \times 26 = 93\,600 \text{ Tonnes}$

IV.2.1.3. Détermination du nombre des chambres à ouvrir mensuellement

Pour déterminer le nombre des chambres à ouvrir mensuellement nous procédons par le calcul en considérant les éléments suivants :

- ✓ P : production mensuelle planifiée (en tonne)
- ✓ Vf : volume mensuel de minerai foisonné (en m³)
- ✓ df : densité de minerai en place (soit 2.4)
- ✓ F : coefficient de foisonnement (f= 1,5)
- ✓ Vp : volume de minerai en place
- ✓ Nch : nombre de chambres à dépiler et remblayer mensuellement.
- ✓ Veff : volume effectif à remblayer pour une chambre dépilée.
- ✓ Veff total : volume effectif total à remblayer mensuellement
- ✓ Vch : volume d'une chambre dépilée.

Ainsi,

$$Vf = \frac{P}{df} = \frac{93600}{2,8} = 33428m^3$$

On sait que

$$f = \frac{Vf}{Vp} \rightarrow Vp = \frac{Vf}{f}$$

$$Vp=22285m^3$$

Donc, le nombre de chambres :

$$Nch = \frac{Vp}{Vch}$$

$$Nch=0,99$$

Nous prenons un nombre de chambres de Nch = 1

Pour évaluer les besoins en matériaux, il va falloir déterminer préalablement le volume d'une chambre dépilée (vide à remblayer). Les chambres réalisées dans la zone ont pour dimensions :

- ✓ Largeur (l) : 15m ;
- ✓ Hauteur (h) : 30m ;
- ✓ Longueur (L) : 50m

Alors :

Le volume de vide (V) par chambre est donné par :

$$V = L \times l \times h = 50 \times 15 \times 30 = 22500$$

Le besoin en matériaux de remblayage peut alors être déterminé comme suit :

$$Q_r = \frac{K_r \cdot V_{eff\ tot} \cdot (1 + \tau \rho) \cdot (1 + \lambda)}{K}$$

Avec :

- ✓ λ = coefficient de tassement du remblai qui est de 0,15 pour l'argile et 0,05 pour les taillings à cause de leur faible granulométrie.
- ✓ P = coefficient tenant compte des pertes de remblai entraîné par l'eau (il vaut 0,15 pour l'argile et 0,02 pour les taillings)
- ✓ K = coefficient de foisonnement du remblai ($K = 1,05$ pour le sable et les taillings et 1,50 pour les roches de dureté moyenne)
- ✓ K_r = coefficient tenant compte de la présence des cheminées. Nous n'en tiendrons pas compte dans nos calculs.

Le volume total à remblayer mensuellement est de :

$$V_{eff\ tot} = N_{ch} \times V_{eff} = 1 \times 22500 = 22500 m^3$$

Avec les données ci-haut, la quantité de matériaux de remblayage est donnée par :

$$Q_r = \frac{22500(1+0,02)(1+0,05)}{1,05} = 22950 m^3$$

IV.2.1.4. Quantification du remblai hydraulique cimenté

Le remblayage hydraulique cimenté engendre un cout opératoire qui est lié à la préparation et au transport du remblai, mais avant de calculer le cout, nous devons connaître la quantité des matériaux à remblayer dans une chambre. Le tableau présente les caractéristiques attendues des boues des résidus de Kamoya.

Tableau IV. 1 Caractéristiques attendues des boues des résidus

Paramètre	Résidus acides	Source
Densité spécifique des solides (SG)	4.036	STL (Travail d'essai)
Taux de vide final	1.11	BMPCE (Travail d'essai)
Densité sèche placée (t/m³)	1.994	BMPCE (Travail d'essai)
Placement	Hydraulique	METC
% de solides dans l'eau en masse	55,0	METC
Taux de dépôt de conception (taux secs moyens/mois)	15 675	METC
Volume de lisier (m³/mois)	28 500	Époque (calculée)

IV.2.1.5. Calcul de la densité pulpe

$$\% \text{Solide} = \frac{ds(dp-1)}{dp(ds-1)} \times 100$$

$$\% \text{Solide} = \frac{4.036(dp-1)}{dp(4.036-1)} = 0.55$$

$$4.036dp - 4.036 = 3.036dp \times 0.55$$

$$4.036dp - 1.6698dp = 4.036$$

$$2.3662dp = 4.036$$

$$dp = 4.036 / 2.3662 = 1.7$$

La quantité de remblais hydraulique correspondant au volume de la chambre est :

$$22950 \times 1.7 = 39015 \text{ Ts}$$

Cette quantité représente 55% de solide continu dans la pulpe, le poids de la pulpe est donc égal à (39015x100) :55=70936.36 tonnes de pulpes.

Le volume de pulpe pour remblayer 1 chambre est égal à 70936.36/1.7=41727,27m³ de pulpe.

Le temps de réalisation du remblayage hydraulique cimenté sans tenir compte de la mise à disposition est égal à :

$$\text{Temps de production} = 41727 ; 27/150 = 278,18$$

Par heure nous aurons à envoyer dans la mine 123.75 Ts/heure

Pour avoir une bonne résistance à la compression simple du remblai hydraulique et une bonne cohésion, nous avons ajouté 6% de ciment portland ; le pourcentage ciment peut à utiliser peut-être fixé après des études de laboratoire. Etant donné que nous n'avons pas eu accès au laboratoire, nous avons pris cette valeur dans la marge requise pour les remblais hydrauliques qui de de 3 à 10% de la quantité de résidus.

Ainsi la quantité de ciment sera égale à $(70936,35 \times 6)/100=4256,18$ Tonnes ciment pour remblayer une chambre.

Le poids du remblai hydraulique nécessaire au mélange est $(70936,36 - 4256,18) = 66680,18$ Tonnes de HBF.

La quantité de ciment à mélanger par heure est égale à $\frac{123,75 \times 6}{100} = 7,425$ Tonnes/heure

IV.2.1.6. Détermination de l'afflux d'eau d'embouage

L'opération de remblayage dans la mine amène toujours une quantité supplémentaire d'eau qu'on doit gérer et évacuer.

Le volume d'eau correspondant au volume de remblai hydraulique cimenté pour le remblayage d'une chambre est égale à : 18777,27

$$\frac{70936,36 - 39015}{1,7} = 18777,27 m^3 \text{ d'eau}$$

IV.2.1.7. Calcul des stoupures (barricades) [musans, 2003]

La stoupure doit résister à la poussée résultant de la pression du remblai dans la chambre, elle est donc en béton et tout le calcul consiste alors à déterminer son épaisseur à partir de :

- ✓ La pression d'essai du barrage P_s qui est celle de la lavée sur la section de la stoupure ;
- ✓ La pression résultant de la force d'ancrage de la stoupure dans le massif et du poids propre du barrage ;

La pression de la lavée sur la stoupure est donnée par

$$P_s = K \cdot d \cdot h \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

Avec :

- ✓ K : Coefficient de sécurité, soit $K = 1,1$
- ✓ h : hauteur du barrage (stoupure), soit $h = 30m$ (la hauteur de la chambre)
- ✓ d : densité de la lavée, soit $1,55 \text{ Kg/m}^3$

$$P_s = 1,1 \times 1,5 \cdot 10^{-3} \times 3000 = 0,495 \text{ Kg/cm}^3$$

La pression résultant de la force d'ancrage a été déterminée selon l'expérience de kamoya, mine qui a défini une valeur de $P_s=5 \text{ kg/cm}^2$ pour une densité de taillings $d=2\text{kg/dm}^3$. Nous admettons donc aussi cette valeur de $P_s=5\text{kg/cm}^2$.

La condition ci-après doit être respectée :

$$P_s.SS < P_s.c.eS$$

Avec $c=2(1+h)$, contour de la stoupure

Alors on a

$$\frac{P_s.L.H}{2(L+h)} < eS$$

En remplaçant on aura :

$$\frac{0,49..5000.3000}{2.5(5000+3000)} < 92\text{cm}$$

La stoupure doit donc avoir une épaisseur $> 92\text{cm}$ pour garantir sa résistance.

Le volume du béton correspondant est obtenu en multipliant la surface de la stoupure par son épaisseur, on a :

$$V_{\text{béton}}=S_s \times e_s=L \times h \times e_s=50 \times 30 \times 0,92=1380\text{m}^3$$

$$V_{\text{béton}}=1380\text{m}^3$$

Tableau IV. 2 Résultat sur la construction des barricades

	H(m)	L (m)	$S_s= L .h(\text{m}^2)$	$e_s(\text{m})$	Volume beton
chambre	30	50	1500	0.92	1380

Tableau IV. 3 Billan du remblai hydraulique

Densité pulpe	1.7
Densité solide	4.035
Pourcentage solide	55
Quantité solide	39015 Tonnes sèche
Poids pulpe CHBF	70936,36Tonnes
Volume pulpe CHBF	41727,27m ³
Temps de réalisation	278.18Heures
Poids du HBF à mélanger	66680,18 Tonnes
Volume HBF à mélanger	47068.36 m ³
Quantité CHBF à envoyer par heure	123.75 Ts/heure
Quantité ciment (6 %)	4256,18Tonnes
Quantité de ciment par heure	7.425 Tonnes/heure
Volume d'eau supplémentaire	18777,27.72m ³
Nombre de chambres ouvertes par mois	1

IV.2.2. Remblai en pate cimentée

La collecte des données nous a permis de réaliser des calculs précis pour le dimensionnement et l'évaluation de remblais miniers en pate cimentée. Dans les lignes suivantes nous présentons les données couramment utilisées dans la littérature recueillies pour le remblayage en pate cimenté.

Tableau IV. 4 les données couramment pour le remblai en pate cimenté

La porosité : 25%	25%
Teneur en eau	15%
Affaissement au cône d'Abrams	254 mm
Densité des résidus miniers	2.6 t/m ³
Densité du ciment	3.15 t/m ³
Densité du RCP	2.3 t/m ³

IV.2.2.1. Calcul du volume de la chambre :

$$\text{Volume} = \text{Longueur} \times \text{Largeur} \times \text{Hauteur} = 50\text{m} \times 15\text{m} \times 30\text{m} = 22500 \text{ m}^3$$

En considérant un coefficient de sécurité de 1.02 nous aurons

$$22500 \times 1.02 = 22950 \text{ m}^3$$

IV.2.2.2. Estimation de la masse de résidus miniers :

La masse des résidus est calculée à partir du volume de solides dans les résidus, qui est de 75 % du volume total (correspondant à une porosité de 25 %).

$$\begin{aligned} \text{Masse de résidus} &= \text{Volume de solides} \times \text{Densité des résidus} \\ &= 0.75 \times 22950 \text{ m}^3 \times 2.6 \text{ t/m}^3 = 44752,5 \text{ tonnes.} \end{aligned}$$

IV.2.2.3. Calcul des quantités de ciment et d'eau :

Le taux de ciment est de 6% de la masse total des résidus

$$\text{Masse de ciment} = 0.06 \times 44752,5 \text{ tonnes} = 2685,15 \text{ tonnes}$$

$$\text{Masse d'eau} = 15\% \text{ de la masse de résidus} = 670.88 \text{ tonnes.}$$

IV.2.2.4. Calcul du volume de RCP :

Connaissant la densité du RCP, le volume du remblai sera donné par :

$$\begin{aligned} \text{Volume de RCP} &= (\text{Masse de résidus} + \text{Masse de ciment} + \text{Masse d'eau}) / \text{Densité du RCP} \\ &= 20916,75 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

IV.2.3. Remblai rocheux (cimenté)

IV.2.3.1. Calcul du volume de la chambre

Le volume de l'espace à remblayer est donné par :

$$\begin{aligned} V &= L \times l \times H \\ &= 50 \times 15 \times 30 \\ &= 22500 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

En considérant un coefficient de sécurité de 1.02,

$$V = 22950 \text{ m}^3$$

IV.2.3.2. Calcul de la masse totale d'agrégats

Les agrégats rocheux sont utilisés dans notre remblai à 70% ; donc on aura

$$M = 22950 \times 0.70 \times 2.7 = 43375,5 \text{ tonnes}$$

IV.2.3.3. Masse de ciment (Mc)

Le taux massique de ciment est de 4% donc :

$$M_c = M \times 0.04 = 40162,5 \times 0.04$$

$$M_c = 1735,02 \text{ tonnes}$$

IV.2.3.4. Masse d'eau (Mw)

Avec un ratio eau /ciment de 0.3 nous utilisons la formule :

$$\text{On aura } M_w = 0.3 \times M_c = 0.3 \times 1735,02 \approx 520,51 \text{ tonnes}$$

La quantité totale du remblai rocheux sera :

$$M + M_c + M_w = \mathbf{45631,03T}$$

IV.3. MODELE DE PREDICTION DE LA RESISTANCE DES REMBLAIS CIMENTES

Un certain nombre de modèles a été proposé par divers chercheurs pour pouvoir prédire et évaluer le comportement mécanique du remblai pendant la phase de conception. Ces modèles se basent sur les propriétés des matériaux utilisées.

IV.3.1. Prédiction de la résistance du remblai Hydraulique

Pour les **remblais hydrauliques**, la formule la plus couramment utilisée est celle qui est basée sur le **rapport eau/ciment** (W/C) et la proportion de ciment, car ces paramètres sont cruciaux pour la résistance et la performance des remblais hydrauliques.

La formule qui ressort souvent pour les remblais hydrauliques est la suivante :

$$U_{cs} = a \cdot \left(\frac{c}{w}\right)^b \cdot t^c \quad (\text{IV.1})$$

Avec

✓ $b = 0.5$: influence de la teneur en ciment (ACI 207.3R-94, *Guide for Practices on Cemented Paste Backfill*, ACI)

✓ $c = 0.7$: influence du temps de cure (*SME Mining Engineering Handbook*, 3rd Edition)

- ✓ C = 6% = 0.06 (teneur en ciment)
- ✓ W = 4 (rapport eau/ciment)
- ✓ t = 28 jours (temps de cure)

Étapes de calcul :

$$\text{Calcul de } \frac{C}{W} = \frac{0.06}{4} = 0.015$$

Élévation à la puissance b (0.5)

$$\left(\frac{C}{W}\right)^b = (0.015)^{0.5} = \sqrt{0.015} = 0.12247$$

$$\text{Élévation du temps à la puissance ccc (0.7)} \quad t^c = 28^{0.7} = 10.3$$

Multiplication des termes :

$$UCS = 1.2 \times 0.12247 \times 10.3 = \mathbf{1.51 \text{ MPa}}$$

IV.3.2. Prédiction de la résistance du remblai en pâte cimenté

Le modèle de Yu (1989)

Yu (1989) a modifié le modèle d'Arioglu pour avoir une relation entre la résistance en compression du remblai en pâte cimenté et la proportion du liant :

$$UCS = e^{0.25 C}$$

Cette formule simplifiée est principalement utilisée pour le **remblai en pâte cimentée (RCP)**. Ce type de remblai est un mélange homogène de résidus miniers, de ciment et d'eau, où la teneur en ciment joue un rôle crucial dans le développement de la résistance mécanique.

$$UCS = e^{(0.25 \times 0.06)} = \mathbf{1.015 \text{ MPa}}$$

IV.3.3. Prédiction de la résistance du remblai rocheux

Formule empirique de Yu

Elle est largement utilisée car elle permet de prédire la résistance d'un remblai cimenté en fonction des propriétés des matériaux utilisés et des conditions de mise en place. Elle prend en compte les effets combinés de l'eau, du ciment, de la porosité et du temps de cure, qui sont des facteurs déterminants pour les remblais cimentés dans les environnements souterrains et de construction.

$$UCS = 0.7 \cdot C^{1.5}$$

$$UCS = 0.7 \cdot 0.06^{1.5}$$

UCS= 325 kpa ou **0.325 MPa**

IV.4. CONCLUSION PARTIELLE

Au terme de ce chapitre, il ressort que la quantification des matériaux de remblayage constitue une étape essentielle dans la planification technique et économique de l'exploitation souterraine. Les calculs effectués ont permis d'estimer les besoins réels en remblai en fonction du volume des chambres à remblayer, des caractéristiques géométriques des vides miniers et des propriétés des matériaux disponibles. Cette démarche a également montré l'importance de bien distinguer les différents types de remblayage, notamment le remblai hydraulique cimenté, le remblai en pâte cimentée et le remblai rocheux cimenté, chacun présentant des exigences spécifiques en termes de volume, de résistance et de coût.

L'analyse a également mis en évidence que la résistance du remblai dépend fortement de paramètres tels que la teneur en ciment, le rapport eau/ciment, la porosité et le temps de cure. Les modèles de prédiction utilisés permettent d'anticiper le comportement mécanique du remblai et d'orienter le choix du type le plus adapté aux conditions du site. Ainsi, ce chapitre fournit les bases nécessaires pour aborder, dans le chapitre suivant, l'évaluation économique et l'interprétation des résultats, afin de comparer les différentes solutions de remblayage envisagées pour le projet.

CHAPITRE V. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

V.1. INTRODUCTION

Le cinquième chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus à l'issue de l'étude technico-économique et met en évidence les implications pratiques du choix du remblai retenu. Il permet d'analyser les performances des différentes solutions étudiées, de discuter leur pertinence dans le contexte spécifique de la mine de Kamoya et de dégager les enseignements essentiels pour l'exploitation souterraine. Cette partie vise également à confronter les résultats aux exigences de stabilité, de sécurité, de coût et de durabilité afin de justifier le choix final proposé. Enfin, elle ouvre la voie à des recommandations opérationnelles destinées à améliorer la gestion du remblayage dans la mine.

V.2. ANALYSE ECONOMIQUE

En matière de coûts d'un système de remblayage, il existe des écarts sensibles entre les différents types de remblai. Les analyses de coûts globaux montrent que le remblai hydraulique cimenté est celui qui présente les investissements et les charges d'exploitation les plus faibles, tandis que le remblayage rocheux cimenté, associé à un transport par bennes, est généralement la solution la plus onéreuse. Lorsque les conditions locales sont favorables au remblayage hydraulique, que le matériau approprié est disponible et que l'obturation des ouvertures peut être réalisée aisément, ce type de remblai constitue donc une option particulièrement avantageuse.

Dans le cadre du projet de remblayage à Kamoya, les coûts du remblai en pâte cimentée (CPF), du remblai rocheux cimenté (CRF) et du remblai hydraulique cimenté sont comparés ci-après afin de mettre en évidence leurs différences économiques et leurs implications pour l'exploitation.

Tableau V. 1 Coût unitaire des trois types de remblai étudiés pour notre projet

Type de remblai	Coût du ciment et de la préparation (USD/tonne)	Coût du transport (USD/tonne)	Coût d mise en place (USD/tonne)	Coût total (USD/tonne)
CHBF	6.48	1.3	1.5	9,28
CPF	14.05	6	3	23,05
CRF	8.5	9.54	4	22,04

V.2.1. Remblayage hydraulique cimenté

Calcul du coût pour le remblayage d'une chambre avec le CHBF

Le coût opératoire pour placer une tonne de remblai hydraulique cimenté est égal à 9.28 USD

Le coût total pour remblayer une chambre par remblayage hydraulique cimenté est donc :
 $66680,12 \text{ Tonnes} \times 9.28 = \mathbf{618791.51 \text{ USD}}$

Calcul du coût d'exhaure supplémentaire

L'opération de remblayage hydraulique dans la mine, amène une quantité d'eau supplémentaire qu'on doit gérer et évacuer.

Le coût unitaire pour exhauser un mètre cube d'eau dans la mine souterraine est égal à 1,5 USD

Le coût total pour l'exhaure supplémentaire sera :

$$C_{\text{exh}} = 1,5 \times 18777.27 = \mathbf{28165.9 \text{ USD}}$$

$$\text{Le coût total} = \mathbf{618791.51 \text{ USD} + 28165.9 \text{ USD} = 646957,42 \text{ USD}}$$

V.2.2. Remblai en pâte cimenté

Calcul du coût pour le remblayage d'une chambre avec le remblai en pâte cimenté

$$24608,15 \times 23.05 = \mathbf{567217,86 \text{ USD}}$$

V.2.3. Le remblai rocheux

$$42250,95 \times 22.04 = \mathbf{931210,94 \text{ USD}}$$

V.3. INTERPRETATION DES RESULTATS

V.3.1. Analyse économique et géotechnique des types de remblais

- ✓ Remblayage hydraulique cimenté : Le remblayage hydraulique cimenté présente, dans notre étude de cas, le coût unitaire le plus faible parmi les trois options considérées, principalement grâce à la réduction des coûts de transport et à la possibilité d'alimenter les chantiers par pompage des boues ; ces conditions rendent ce procédé économiquement attractif lorsque des résidus pulvérulents et suffisamment abondants sont disponibles sur place. Géotechniquement, ce remblai fournit une bonne fluidité pour l'emplacement et une homogénéité de distribution ; sa résistance dépend fortement du rapport eau/ciment

et du pourcentage de ciment (ici retenu à 6% en l'absence d'essais) qui conditionnent l'évolution de l'UCS avec le temps de cure.

- ✓ Remblai en pâte cimentée (RCP) : Le remblai en pâte cimentée combine une faible perméabilité et une bonne cohésion à long terme, ce qui le rend particulièrement adapté aux zones où la maîtrise des infiltrations et la stabilité des voûtes ou des galeries sont critiques; son coût est intermédiaire, lié au besoin en ciment et à la préparation des pâtes. La prévision de résistance pour le RCP est fortement corrélée à la teneur en ciment selon les modèles empiriques (par ex. Yu, Arioglu), et nécessite des essais en laboratoire pour optimiser le dosage et garantir la durabilité.
- ✓ Remblai rocheux cimenté : Le remblai rocheux cimenté présente généralement les coûts d'exploitation et d'investissement les plus élevés, en particulier lorsque le transport par bennes est nécessaire; cependant, il offre une masse de remblai avec de grandes résistances mécaniques et une faible sensibilité à la dessiccation si le granulat et le liant sont correctement formulés. Géotechniquement, il est le plus adapté aux zones où l'on requiert une portance élevée et une résistance immédiate, mais son emploi doit être justifié par l'analyse coût-bénéfice face aux alternatives plus économiques.

V.3.2. Gestion de l'eau dans le remblayage hydraulique cimenté

- ✓ Volume et évacuation : Le remblayage hydraulique engendre des volumes d'eau significatifs à gérer (exemple : volume d'eau supplémentaire estimé pour une chambre dans notre cas), ce qui impose des installations de pompage et de décantation adaptées et des coûts d'exhaure non négligeables dans le bilan économique.
- ✓ Contrôle de la qualité et ségrégation : La stabilité et la performance du remblai dépendent de la gestion de la teneur en eau et de la prévention de la ségrégation solide/liquide ; un contrôle rigoureux du rapport solide/eau à la centrale de mélange et des bassins de décantation permet de maintenir la qualité du produit pompé.
- ✓ Moyens techniques : Il est nécessaire de prévoir des bassins de décantation, des systèmes de recirculation d'eau et des stations de pompage dimensionnées pour le débit attendu, ainsi que des procédures de surveillance (tests de densité, teneur en solides) pour minimiser les risques opérationnels et environnementaux.

V.3.3. Résistance et stabilité à long terme

- ✓ Développement de résistance : Pour tous les types de remblais cimentés, la résistance en compression uniaxiale (UCS) augmente avec le taux de ciment et le temps de cure; les modèles empiriques utilisés (ex. formules basées sur WC et teneur en ciment) montrent que des dosages modestes (3–10%) peuvent assurer des UCS suffisantes pour le soutènement si correctement formulés et mis en œuvre.
- ✓ Comportement différentiel et tassement : Les remblais contenant des fractions fines (remblayage hydraulique, RCP) sont sujets au tassement et au retrait hydrique; ces transformations doivent être prises en compte dans le dimensionnement des ouvertures et des ouvrages annexes (stoupures, barricades) pour garantir la stabilité à long terme.
- ✓ Durabilité mécanique : La durabilité dépend de la qualité des matériaux (résidus, granulats), du liant, et des conditions hydriques; des essais systématiques de contrôle (essais UCS à différents âges, perméabilité) sont nécessaires pour valider les prévisions et ajuster les dosages si besoin.

V.3.4. Problèmes liés au transport

- ✓ Remblai hydraulique cimenté : Avantage principal : possibilité de transport par canalisation/pompage réduisant les coûts pour les sites où la logistique routière est limitée ; inconvénient : sensibilité aux colmatages, nécessité d'équipements de pompage et d'un entretien régulier des conduites.
- ✓ Remblai en pâte cimentée : Transport par pompe ou camion-benne selon la viscosité ; la mise en place peut exiger des moyens intermédiaires (pompes haute pression, mélangeurs sur site) et une coordination logistique afin d'éviter les interruptions de fourniture qui dégradent la cohésion du produit.
- ✓ Remblai rocheux cimenté : Nécessite souvent transport mécanique (bennes, tombereaux) qui augmente fortement les coûts et les contraintes d'exploitation ; la taille des agrégats et la manutention influencent les temps d'intervention et l'usure du matériel.

V.3.5. Aspects environnementaux et durabilité

- ✓ Gestion des effluents : Le traitement et la réutilisation de l'eau de remblayage (décantation, recyclage) réduisent l'impact hydrique et les coûts d'exhaure, mais nécessitent des installations adaptées et des plans de gestion des boues pour éviter la contamination des eaux de surface ou souterraines.
- ✓ Utilisation des résidus : L'emploi des résidus miniers comme matériaux de remblai constitue une valorisation qui diminue les besoins en matériaux externes et les impacts

liés à leur extraction, à condition de contrôler la mobilité des éléments contaminants par des études de lixiviation et des mesures de confinement si nécessaire.

- ✓ Empreinte carbone et consommation de ciment : Le ciment est le composant ayant la plus forte empreinte carbone; optimiser les formulations (minimiser la teneur en ciment tout en garantissant la sécurité) et envisager des liants alternatifs ou des cendres auxiliaires peut améliorer la durabilité globale du procédé.

V.4. CONCLUSION PARTIELLE

Sur la base des calculs et des comparaisons effectués, le remblayage hydraulique cimenté apparaît comme la solution économiquement la plus attractive pour le projet étudié lorsque les résidus appropriés sont disponibles et que la gestion de l'eau est maîtrisée, tandis que le remblai rocheux cimenté, bien que plus résistant en masse, entraîne des coûts de transport et d'exploitation plus élevés. Toutefois, le choix final doit intégrer des essais de laboratoire pour affiner les dosages (notamment la teneur en ciment et le rapport eau/ciment), des études détaillées de gestion des eaux et des tests de performance (UCS, perméabilité, tassement) pour garantir la sécurité et la durabilité à long terme dans les conditions spécifiques du site.

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

1. CONCLUSION GENERALE

La présente étude, intitulée « **Étude technico-économique du choix du remblai optimal pour assurer la stabilité des excavations dans une mine souterraine (cas de la mine de Kamoya)** », avait pour objectif principal d'identifier une solution de remblayage capable d'assurer la stabilité durable des ouvrages miniers tout en conciliant les exigences de sécurité, de performance technique et de rentabilité économique. Cette problématique revêt une importance capitale dans le contexte actuel de l'exploitation minière souterraine, où l'approfondissement des travaux et la complexité croissante des conditions géologiques imposent une gestion rigoureuse de la stabilité des excavations.

La démarche adoptée dans cette recherche s'est appuyée sur une revue approfondie de la littérature scientifique, l'analyse des méthodes d'exploitation souterraine, l'étude des différentes techniques de remblayage ainsi que l'évaluation comparative de leurs performances techniques et économiques. Cette approche a permis de mieux comprendre le rôle essentiel que joue le remblayage dans le maintien de l'équilibre géomécanique des excavations, la réduction des risques d'instabilité du massif rocheux, la protection des travailleurs, l'amélioration du taux de récupération du minerai et la limitation des impacts environnementaux liés à la gestion des résidus miniers.

L'analyse des différents types de remblais a montré que le remblai rocheux, le remblai hydraulique, le remblai en pâte cimentée et les remblais composites possèdent chacun des caractéristiques propres qui conditionnent leur domaine d'application. Leur efficacité dépend notamment de leurs propriétés mécaniques, de leur comportement à long terme, de leur facilité de mise en œuvre, de la disponibilité des matériaux et des contraintes économiques de l'exploitation. Il ressort ainsi que le choix d'un remblai ne peut être fondé sur un seul critère, mais doit résulter d'une analyse globale intégrant les aspects géotechniques, opérationnels, environnementaux et financiers.

Les résultats obtenus au cours de cette étude mettent en évidence que le remblai hydraulique constitue la solution la plus performante pour les conditions d'exploitation étudiées. Grâce à sa résistance mécanique élevée, sa bonne cohésion et sa capacité à assurer un excellent soutènement des excavations, il contribue efficacement à la stabilité du massif rocheux et à la sécurité des travaux souterrains. Bien que son coût de mise en œuvre soit supérieur à celui du

remblai en pâte cimentée, cet investissement est largement compensé par la réduction des risques d'effondrement, l'amélioration de la récupération des réserves minières et la diminution des coûts liés aux incidents géotechniques. Le remblai en pâte cimentée représente également une solution intéressante dans certaines conditions d'exploitation, tandis que le remblai rocheux demeure une option économiquement avantageuse lorsque les stériles sont disponibles en quantité suffisante.

Au regard des objectifs fixés au début de cette recherche, il peut être affirmé que ceux-ci ont été atteints. Cette étude a permis de proposer une approche scientifique pour le choix d'un remblai optimal en tenant compte simultanément des performances techniques, des exigences de sécurité et des contraintes économiques propres à la mine de Kamoya. Les résultats obtenus constituent une contribution susceptible d'aider les responsables techniques de la mine dans leurs prises de décision relatives à la conception et à la gestion des opérations de remblayage.

Toutefois, comme toute recherche scientifique, cette étude présente certaines limites. Les analyses reposent principalement sur les données techniques disponibles et sur les modèles théoriques étudiés. Elles gagneraient à être complétées par des essais expérimentaux réalisés sur les matériaux provenant directement de la mine de Kamoya, ainsi que par des simulations numériques permettant d'évaluer le comportement des remblais sous différentes conditions de chargement et de contraintes géomécaniques. De telles investigations permettraient de confirmer les résultats obtenus et d'optimiser davantage les formulations proposées.

En définitive, cette étude démontre que le choix judicieux d'un remblai constitue un facteur déterminant pour la réussite des exploitations minières souterraines modernes. Un remblayage convenablement conçu améliore non seulement la stabilité des excavations et la sécurité des travailleurs, mais contribue également à la valorisation optimale des ressources minérales, à la réduction des coûts d'exploitation et à une gestion plus durable des résidus miniers. Ainsi, l'intégration des critères techniques, économiques, géotechniques et environnementaux dans le processus de sélection des remblais représente une démarche indispensable pour garantir la pérennité et la compétitivité des exploitations minières souterraines, notamment dans le contexte de la mine de Kamoya.

2. SUGGESTIONS ET RECOMMANDATIONS

Au regard des résultats obtenus au cours de cette étude, les recommandations suivantes sont formulées.

À l'intention de la Direction de la mine de Kamoya :

- ✓ Mettre en place une politique permanente de contrôle géotechnique des excavations souterraines afin de prévenir les risques d'instabilité.
- ✓ Réaliser systématiquement des essais de laboratoire avant l'utilisation industrielle de tout nouveau mélange de remblayage.
- ✓ Privilégier les formulations de remblai offrant le meilleur compromis entre résistance mécanique et coût d'exploitation.
- ✓ Moderniser les installations de préparation, de transport et de mise en place des remblais afin d'améliorer la qualité des opérations de remblayage.
- ✓ Renforcer la surveillance des barricades et des ouvrages de confinement lors des opérations de remblayage hydraulique.

À l'intention des ingénieurs et du personnel technique :

- ✓ Respecter rigoureusement les procédures de dosage des matériaux de remblayage.
- ✓ Effectuer un contrôle régulier de la qualité des matériaux utilisés ainsi que de leur résistance après durcissement.
- ✓ Assurer un suivi permanent des déformations des excavations remblayées à l'aide d'instruments de surveillance géotechnique.
- ✓ Renforcer la formation continue du personnel sur les techniques modernes de remblayage et les mesures de sécurité en milieu souterrain.

À l'intention des chercheurs et des futurs étudiants :

- ✓ Réaliser des essais mécaniques sur les matériaux provenant directement de la mine de Kamoya.
- ✓ Développer des modèles numériques permettant de simuler le comportement des différents types de remblais sous diverses conditions géomécaniques.
- ✓ Étudier l'utilisation de liants alternatifs moins coûteux et plus respectueux de l'environnement.

- ✓ Évaluer les performances des remblais composites élaborés à partir des résidus miniers locaux afin de réduire les coûts de production et de valoriser les déchets miniers.

En appliquant ces recommandations, la mine de Kamoya pourra améliorer la stabilité de ses excavations, renforcer la sécurité des travailleurs, réduire les coûts liés au remblayage et optimiser la récupération des ressources minérales, tout en s'inscrivant dans une démarche de développement minier durable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gécamines. (2023). *Rapports techniques sur les exploitations minières souterraines de Kamoya*. Lubumbashi, RDC.
- Ministère des Mines de la République Démocratique du Congo. (2018). *Code Minier de la République Démocratique du Congo*. Kinshasa.
- Paquet, J. (1997). *Exploitation des Mines Souterraines*. Éditions Technip, Paris.
- Stassen, P. (1982). *Mécanique des sols et des roches*. Presses Universitaires.
- Ibrahima HANE (2015) : caractérisation en laboratoire de remblai en pate cimenté avec ajout de granulats (stériles concassés), mémoire présenter en vue de l'obtention du diplôme de maitrise en sciences appliquées (génie minéral)
- Belem, T. (2013). *Mine Backfill Research: Materials, Properties and Applications*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Canada.
- Belem, T., & Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
- Benzaazoua, M., Belem, T., & Bussière, B. (2005). Chemical factors influencing the performance of cemented paste backfill. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 450-457.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Potvin, Y., Thomas, E., & Fourie, A. (2005). *Handbook on Mine Fill*. Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- Thomas, E. G., & Holtham, P. N. (1989). Hydraulic Fill Classification and Performance in Underground Mines. *CIM Bulletin*, 82(924), 67-74.
- Yu, T. R., & Counter, D. B. (1983). Consolidated Sand Rockfill in Underground Mining. *CIM Bulletin*, 76(850), 78-85.