



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : génie minier

Option : Electromécanique minière

**Amélioration des paramètres de chargement et
transport par l'optimisation des pertes internes et
externes**

- cas de la mine de boukhadra -

Par

TRAAI Achraf et ZAIZ Mahieddine

Devant le jury:

LOUAFI Messaoud	Président	PROF	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi –Tébessa
HOUAM Ala	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi –Tébessa
FARES Noureddine	Examineur	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi –Tébessa

Année universitaire 2023/2024



Année universitaire : 2023/2024

Tébessa le :

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

TRAAI Achraf

ZAIZ Mahieddine

Niveau : 2^{ème} année master Option : Électromécanique minier

Thème : Amélioration des paramètres de chargement et transport par
l'optimisation des pertes internes et externes.

Nom et prénom de l'encadreur : HOUAM Ala

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chargement et transport	
Aide à la Décision Multicritère	
Application de la méthode MCDM (AHP-WASPAS) au processus de chargement et de transport	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) ترواسي أشرف الصفة : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 402295853 و الصادرة بتاريخ : 2022 . 07 . 04

المسجل بمعهد المناجم قسم الإلكتروسياتيك

و المكلف بانجاز أعمال بحث مذكرة ماستر ، عنوانها :

*Amélioration des paramètres de chargement et transport
Par l'optimisation des pertes internes et externe.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:

امضاء المعني (ة)





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) زاييز صبي الدين : الصفة : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 400951876 و الصادرة بتاريخ : 11.03.2022

المسجل بمعهد الضاحم قسم الإلكترونيك

و المكلف بانجاز أعمال بحث مذكرة ماستر ، عنوانها :

- Amélioration des paramètres de chargement et transport
Par l'optimisation des pertes internes et externe.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:

06 جوان 2024

امضاء المعني (ة)





بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Nous adressons nos sincères remerciements à Dieu qui nous a aidé à accomplir ce travail.

Nous exprimons notre gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et les sacrifices qu'ils ont consentis.

Nous remercions notre encadreur HOUAM Ala pour Les efforts qu'il a déployés pour nous aider, nous conseiller, nous encourager, nous guider et être patient avec nous.

Nous tenons à remercier les membres du jury pour leur acceptation Pour vérifier notre travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les membres du corps professoral de l'Institut des Mines. Qui a contribué à notre formation universitaire.

Nous adressons nos remerciements à toute l'équipe de la mine de Boukhadra Pour nous aider et nous guider pendant notre stage.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

Avec ma sincère gratitude.

Merci à tous.



Dédicace

*Tout d'abord, je voudrai remercier Dieu pour la
bénédiction du succès.*

*Je voudrai consacrer cet humble travail :
À mes parents qui ont été pour moi une source
d'encouragement, ainsi qu'à toute ma famille
surtout ma petite sœur Safa et ma nièce Citrine.*

Je remercie mon binôme : Mahieddine

Dédié à mes meilleurs amis:

Mohamed Akram ; Ouissam ; Mohamed

Ali ; Abdelhamid; Bilel ; Youssef ;

Ahmed El Amine ; Amor Abdelaziz ;

Iskander ; Abderrazak ; Abderrahmane et à

*beaucoup d'autres amis et à tous ceux qui m'aiment
et ceux que j'aime.*

Traai Achraf



Dédicace

*Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu pour la
bénédiction du succès.*

Je voudrais consacrer cet humble travail:

*À mon père décédé, Zaïz Elhadi, à ma
mère qui a été pour moi une source d'encouragement,
à mon oncle Zaïz Kamel qui m'a soutenu pendant
mon apprentissage, ainsi qu'à toute ma famille.*

Je remercie mon binôme : Achraf

*Dédié à mes meilleurs amis surtout Guenez
Feriel qui m'ont soutenu de près ou de loin et à tous
ceux qui m'aiment et ceux que j'aime.*

Zaïz Mahieddine



Table de matières

Remerciement VI

Dédicace..... VII

Dédicace..... VIII

Table de matières..... IX

Liste Des Tableaux XII

Liste Des Figures..... XIII

Liste Des AbréviationsXIV

Introduction Générale..... 1

Chapitre I: Chargement et transport 3

I.1.Introduction:..... 3

I.2.Chargement dans les mines 3

I.2.1. Critères de choix des machines de chargement dans les mines :..... 3

I.2.2. Types des engins de chargement : 4

I.3.Transport : 11

I.3.1.Choix des moyens de transport : 11

I.3.2. Types de machines de transport : 12

I.4. Rendement général du chantier :..... 19

I.4.1. Heures théoriques ou possibles, HP :..... 19

I.5. Combinaison des opérations de chargement et transport :..... 22

I.6. Conclusion : 24

ChapitreII : Aide à la Décision Multicritère 25

II.1. Introduction : 25

II.2. Définition de L'aide à la décision multicritères : 25

II.3. Un bref historique de la méthode MCDM : 25

II.4. Objectif de l'aide à la décision :..... 26



II.5. Notion de critère :	26
II.6. Matrice multicritères :	26
II.7. Étapes générales du MCDM :	27
II.7.1. structurer le problème de décision :	27
II.7.2. Détermination et application de la méthode MCDM :	27
II.7.3. Détermination de la recommandation finale MCDM :	27
II.8. Classification des techniques MCDM :	28
II.9. Techniques du MCDM :	28
II.9.1. AHP (Analytic Hierarchy Process) :	29
II.9.2. TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) :	32
II.9.3. ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality) :	33
II.9.4. VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) :	34
II.9.5. MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis) :	35
II.9.6. COPRAS (Complex Proportion Assessment Method) :	36
II.9.7. PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) :	37
II.9.8. WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) :	38
II.10. Conclusion :	42
Chapitre III : Application de la méthode MCDM (AHP-WASPAS) au processus de chargement et de transport.....	43
III.1. Introduction :	43
III.2. Présentation de la mine :	43
III.2.1. Situation géographique :	43
III.2.2. Historique de la mine :	45
III.2.3. La minéralisation et morphologie du gisement :	47
III.2.4. Mode d'exploitation :	48
III.2.5. Le régime de travail :	48





III.3. Calcul des paramètres nécessaires des équipements miniers de chargement et transport :	48
III.3.1. Scénario 01 :	50
III.3.2. Scénario 02 :	53
III.3.3. Scénario 03 :	55
III.3.4. Scénario 04 :	57
III.3.5. Scénario 05 :	59
III.4. Application de la méthode MCDM :	61
III.4.1. Matrice MCDM :	61
III.4.2. Calcul du poids des critères (AHP) :	61
III.4.3. Application de la technique WASPAS :	64
III.5. Conclusion :	68
Conclusion Générale	69
Références bibliographies	71
Annexe	74
Résumé	76



Liste Des Tableaux

Tableau I.1 : les classes d'heures.....	21
Tableau II.1 : Échelle de préférence de Saaty.	31
Tableau III.1 : Représente les réserves géologiques et exploitables (31/12/2018).....	48
Tableau III.2 : représente le régime de travail à ciel ouvert deboukhadra	48
Tableau III.3 : Matrice des critères	61
Tableau III.4 : L'importance des critères	61
Tableau III.5 : Matrice de comparaison.....	62
Tableau III.6 : Matrice normalisée	62
Tableau III.7 : Poids des critères	62
Tableau III.8 : Indice de cohérence aléatoire (IR)	64
Tableau III.9 : Matrice des critères	64
Tableau III.10 : Matrice normalisée	65
Tableau III.11 : Score de performance pour chaque scénario (WSM etWPM).....	66
Tableau III.12 : Score de performance pour chaque scénario et leur classement (WASPAS).....	66



Liste Des Figures

Figure I.1 : Types des engins de chargement 5

Figure I.2 : Pelle hydraulique sur pneus 6

Figure I.3 : Pelle hydraulique sur chenilles..... 6

Figure I.4 : Pelle hydraulique :a-Dimension ; b- Rayons D'action 7

Figure I.5 : Pelle mécanique (à câble) sur chenilles 8

Figure I.6 : Chargeuse sur chenilles 9

Figure I.7 : Chargeuse sur pneus 9

Figure I.8 : Dragline 11

Figure I.9 : Le convoyeur à bande 12

Figure I.10 : Schéma des principaux éléments d'un convoyeur à bande 15

Figure I.11 : Camion 15

Figure I.12 : Procédure de détermination de la flotte de production d'une mine 23

Figure II.1 : Hiérarchie générale de la méthode AHP 29

Figure III.1 : localisation de région de Boukhara 44

Figure III.2 : photo par satellite représente le périmètre de la Mine de Boukhadra 44

Figure III.3: l'organigramme de l'entreprise..... 46

Figure III.4 : Le gisement de boukhadra en 3D 47

Figure III.5 : Carte géologique représente les déférents corps du gisement..... 47

Figure III.6 : Schéma de distribution des machines dans le premier scénario 50

Figure III.7 : Schéma de distribution des machines dans le deuxième scénario 53

Figure III.8 : Schéma de distribution des machines dans le troisième scénario 55

Figure III.9 : Schéma de distribution des machines dans le quatrième scénario 57

Figure III.10 : Schéma de distribution des machines dans le cinquième scénario 59

Figure III.11 : poids des critères 63

Figure III.12 : Les colonnes graphiques représentent le score de performance pour chaque scénario..... 67

Figure III.13 : Courbes représentant les performances de chaque scénario pour chaque technique 68



Liste Des Abréviations

HP : Heures théoriques ou possibles.

HACT : Heures d'activité.

HMD : Heures de mise à disposition.

HM : Heures de maintenance.

HUE : Heures d'utilisation réelle ou effective.

HIMP : Heures improductives.

HINACT: Heures d'inactivité.

MCDM : Prise de décision multi critère(Multi-criteriadecision-making).

MCDA : Analyse décisionnelle multicritère (Multi-criteriadecision-analysis).

MODM : Prise de décision objective multiple (Multiple objective decision making).

MADM : Prise de décision à attributs multiples (Multipleattributedecision making).

W : le poids de critères.

RO : La recherche opérationnelle.

WSM : weighted sum model.

WPM : Weighted product model.

AHP : Processus d'analyse hiérarchique.

WASPAS : Évaluation Pondérée du Produit Somme Agrégée.



Introduction Générale



Introduction Générale

L'industrie minière est considérée comme l'un des piliers les plus importants de l'économie mondiale et dépend de plusieurs processus complexes et interconnectés. Parmi ces processus, le chargement et le transport sont considérés parmi les piliers les plus importants dans ce domaine. Dans la plupart des cas, il s'agit de déterminer l'efficacité globale des opérations minières.[1]

L'exploitation d'une mine à ciel ouvert « open pit » en anglais consiste à extraire des roches ou minerais ayant une valeur économique depuis une excavation créée en surface après avoir enlevé les matériaux stériles qui le surmontent. [2]

Le processus de chargement et de transport dans les mines et les carrières représente un poste clé dans le prix de revient des matériaux. Il comprennent un ensemble d'activités liées les unes aux autres, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur livraison aux installations de transformation. Ces étapes sont extrêmement importantes, mais elles sont souvent faire face à des problèmes et des défis lors du chargement et l'inefficacité dans la gestion du transport, sans oublier les impacts environnementaux résultant de ces opérations.[3][4]

Le choix des machines de chargement et les systèmes de transport de minerai sont considérés comme essentiels lors de l'évaluation de l'efficacité de l'investissement et de la conception des mines à ciel ouvert. Des études et des recherches sont également adoptées pour augmenter la production minière, et l'optimisation de la production des équipements.[5]

L'optimisation du processus de chargement et de transport et l'amélioration de ses paramètres est inévitable pour d'augmenter les revenus, de réduire les coûts, ainsi que de réduire les pertes internes et externes.

La prise de décision multicritère (MCDM) ou analyse de décision multicritère (MCDA) [6]est l'une des méthodes de prise de décision les plus précises et peut être considérée comme une révolution dans ce domaine. Cette méthode est la composition d'un ensemble de critères multiples, d'un ensemble d'alternatives et de leur comparaison d'une manière ou d'une autre. elle considère différents critères qualitatifs et quantitatifs qui doivent être fixés pour trouver la meilleure solution.[7] Elle permet également d'offrant une approche globale d'évaluation et d'amélioration des performances dans un environnement dynamique. [8]

Il existe plusieurs types de méthodes MCDM développées ou améliorées au cours des dernières décennies. Les principales catégories sont la prise de décision multi-attributs



(MADM)[9] et la prise de décision multi-objectifs (MODM)[10] différences entre ces méthodes sont liées au niveau de complexité des algorithmes, aux méthodes de pondération des critères, à la manière de représenter les critères d'évaluation des préférences, à la possibilité d'obtenir des données incertaines et enfin au type d'agrégation des données.

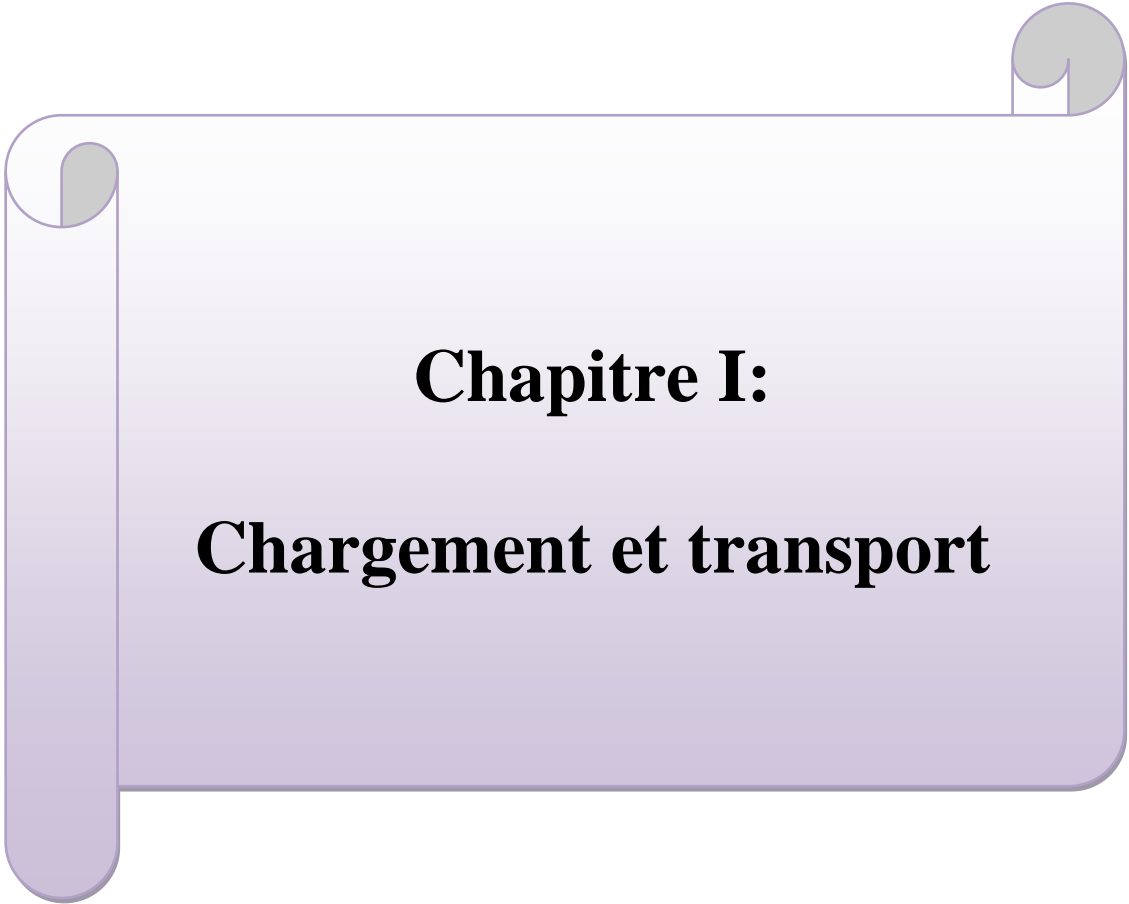
Dans ce travail, un système de répartition en deux étapes est proposé pour optimiser le processus de chargement et transport par le mesure et l'atténuation des pertes internes et externes lors du chargement et du transport des matières premières. Dans un premier temps, les flottes de camions et d'excavatrices sont divisées en sous-flottes pour travailler sur les trois chantiers. Ensuite, nous développons six scénarios et en appliquant le (AHP/ WSM)[11], (AHP/WPM)) [12] et (AHP /WASPAS) [13] intégré. Les résultats de l'approche proposée sont testés dans le cas de la mine de Boukhadra et lorsque les quantités de minerai et de stériles produites par le système de répartition précédent et le système proposé

Cette recherche sera structurée en trois chapitres :

Chapitre 01 : consacré au chargement et au transport, abordera les méthodes utilisées dans les mines à ciel ouvert, en mettant en lumière les processus de chargement et de transport ainsi que leurs impacts sur la productivité.

Chapitre 02 : Il aborde le thème de l'introduction de la méthode MCDM et de certaines de ses techniques.

Chapitre 03 : Dans celui-ci, l'une des techniques MCDM, à savoir AHP et WSM et WPM et WASPAS, est choisie et appliquée dans le domaine du chargement et du transport pour choisir le meilleur scénario possible pour réduire les pertes internes et externes.



Chapitre I:
Chargement et transport



I.1.Introduction :

Le processus de chargement et transport joue un rôle primordial dans l'exploitation des mines à ciel ouvert ou souterraines. Ce processus repose sur deux opérations principales: le chargement des minéraux utiles et des roches stériles du front jusqu'au moyens de transport et le transport de ces derniers vers diverses destinations tel que le concasseur, la mis a terril ou vers la zone de stockage du minerai. Du fait de leur incidence économique, ces deux activités sont indissociables du fait que la productivité des engins de chargement et de transport doit être calculer l'une en fonction de l'autre. [14][15]

Ce chapitre vise à donner les éléments essentiels à la compréhension des équipements, des méthodes et des techniques de chargement et de transport adaptés aux mines à ciel ouvert . Dans la première partie, la définition, les critères de choix ainsi que les Types des engins de chargement sont discutés. Dans la deuxième partie, un aperçu sur les moyens de transport minier est présenté. Ensuite, nous détaillons les productivités de chaque type d'engins.

I.2.Chargement dans les mines :

Le chargement dans les mines à ciel ouvert est une opération minière qui consiste à évacuer les déblais du front de taille vers un engin de transport. Le chargement est une étape essentielle des opérations minières et joue un rôle crucial dans la production minière, Dans n'importe quelle activité minière, le chargement représente un facteur déterminant du prix de revient des matériaux. car le cout du m³ du minerai dépend pratiquement de la quantité de minerai chargée.

I.2.1. Critères de choix des machines de chargement dans les mines :

Le choix des engins de chargement est un facteur très important d'un point de vue productivité puisqu'il a une influence directe sur toutes les opérations d'exploitation des mines et carrières.

La détermination du type d'engin d'excavation et de chargement repose sur plusieurs facteurs naturels, tel que :

- La nature des roches.
- La méthode d'exploitation.
- La production prévue de la carrière.
- Les mesures de sécurités.

Pour garantir un chargement économique et efficace des matériaux d'un point à un autre, il est nécessaire de comprendre la capacité du godet des différents équipements de



chargement disponibles, La puissance et la force d'attaque de l'engin et ainsi que leurs applications les plus rentables.

I.2.2. Types des engins de chargement :

Dans les mines à ciel ouvert, Il existe plusieurs types des moyens de chargement, et chacun d'eux a ses propres capacités et performances, les paramètres de mesure de ces performances sont :

- La capacité du godet ;
- Le temps de cycle ;
- La force de pénétration ;
- La hauteur et la profondeur de creusement ;
- La hauteur et le rayon de creusement ;
- La hauteur et le rayon de déversement ;
- La mobilité et la disponibilité.

Il existe plusieurs critères de classement des engins de chargement utilisées dans les mines a ciel ouvert :

- a) Selon leur mode de fonctionnement on distingue deux catégories principales d'engins: Les engins fonctionnant d'une manière cyclique tel que les pelles mécaniques ou hydrauliques, les chargeuses frontales et les draglines, qui utilisent toutes un godet unique pour effectuer ces opérations, et les engins fonctionnant d'une manière continue tel que les excavateurs à godets multiples, les pelles à roue et les excavateurs à chaîne.
- b) Suivant l'ordre de prise du gradins : on distingue deux mode le mode global et le mode sélective.
- c) Selon l'emplacement de l'excavateur et le point de chargement et déchargement on distingue trois types : butte, retro et fouille.

Le schéma suivant représente les différentes machines de chargement présentes dans la mine :

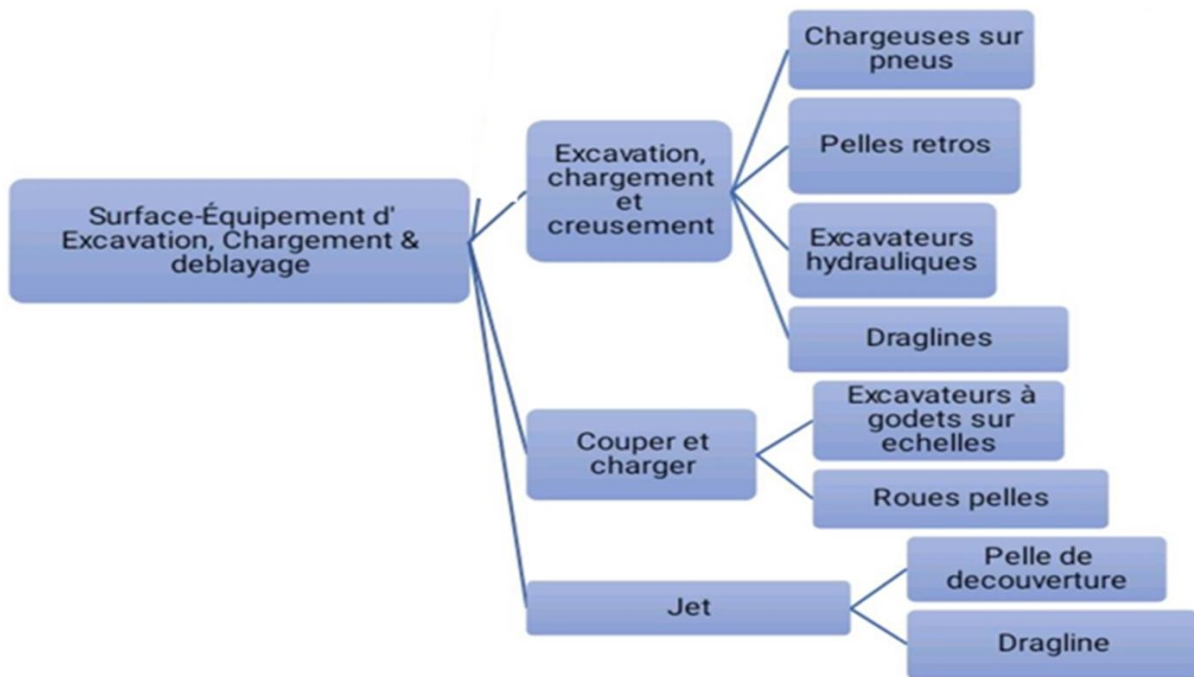


Figure I.1 : Types des engins de chargement

I.2.2.1. Les Pelles :

Une pelle est un engin de terrassement servant pour l'extraction des déblais, le remblaiement, mais également utile dans la destruction et l'excavation. Elle est constituée de châssis sur chenilles ou sur pneus, dit bati fixe. Elle est également équipée d'un bati mobile comprenant une tourelle attachée à une flèche, d'une cabine, d'un rond à galet qui soutient le bras articulé de la pelle et d'un balancier portant un godet. Il existe deux principaux types des pelles : les pelles mécaniques ou à câble et les pelles hydrauliques. Le choix du type de pelle le plus approprié dépend de nombreux facteurs que nous avons mentionnés précédemment.

I.2.2.1.1. Les pelles hydrauliques :

Les pelles hydrauliques sont largement utilisées dans les travaux publics et les mines en raison de sa souplesse d'utilisation offerte par la transmission hydraulique. Ses capacités à travailler en butte ou en rétro à différentes hauteurs offrent aux opérateurs un éventail de solutions techniques, ce qui en fait un outil polyvalent. De plus, sa force de pénétration élevée et le mouvement de cavage du godet sont des caractéristiques fréquemment utilisées. Sa capacité à rester au niveau du sol, ainsi que sa possibilité d'attaquer à la hauteur désirée pour disloquer les matériaux ou purger un front d'abattage, sont autant d'éléments qui contribuent à son utilisation généralisée.

Il existe deux types de pelle hydraulique : la pelle hydraulique sur pneus et la pelle hydraulique sur chenilles.



a. La pelle hydraulique sur pneus :

La pelle hydraulique sur pneus est un équipement polyvalent largement utilisé dans de nombreuses opérations d'excavation et de manipulation de matériaux. Sa capacité à circuler sur les voies publiques lui permet de se déplacer d'un site à l'autre sans nécessiter de transport lourd. Bien qu'elle ne soit pas aussi stable que la pelle à chenilles, elle est généralement équipée de pieds stabilisateurs pour compenser. Cette machine est habituellement équipée d'une pelle, et son châssis supérieur peut pivoter à 360° pour une grande maniabilité. Des bennes et d'autres accessoires peuvent être ajoutés pour améliorer sa polyvalence et son efficacité.



Figure I.2 : Pelle hydraulique sur pneus

b. La pelle hydraulique sur chenilles :

La partie supérieure de l'appareil est similaire à celle de la pelle hydraulique sur pneus. Elle est montée sur un châssis remorqué et est couramment utilisée dans les travaux d'excavation. Toutefois, elle se déplace à une vitesse relativement lente et nécessite un transport lourd pour être déplacée d'un site à l'autre. Les pelles hydrauliques sur pneus ou remorquées utilisent souvent les mêmes bennes et accessoires, ce qui facilite leur interchangeabilité et leur polyvalence .



Figure I.3 :Pelle hydraulique sur chenilles



La cinématique des pelles est généralement conçue selon un agencement en parallélogramme ou en parallèle, notamment dans les équipements de type "butte" ou "chouleur". Les fabricants calculent avec précision les dimensions des vérins et la configuration des éléments de la pelle, tels que le bras, le balancier et le godet, afin de maintenir une force de poussée uniforme sur la dent lors de la pénétration dans le tas, sur toute la course du godet.

En mode "rétro", l'accent est mis sur l'effort de cavage. Pour répondre aux diverses conditions d'exploitation, la plupart des constructeurs proposent des balanciers de longueurs variables. Il est recommandé de vérifier que la plage d'extraction, c'est-à-dire la course horizontale au niveau d'extraction, soit au moins deux fois supérieure au rayon du godet.

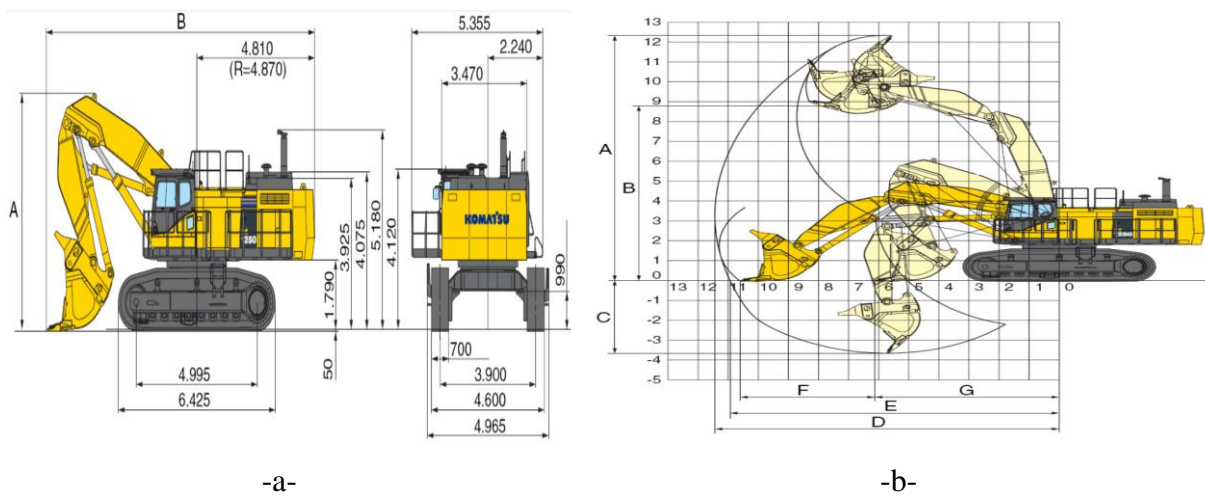


Figure I.4 :Pelle hydraulique :a-Dimension ; b- Rayons D'action

I.2.2.1.2. Les pelles mécaniques (à câble) :

Une pelle mécanique est un engin d'excavation utilisé dans les travaux de construction et d'exploitation minière. Elle est montée sur des chenilles pour une meilleure mobilité sur divers types de terrains. Cette pelle est équipée d'un godet attaché à un système de câbles qui permet de creuser et de déplacer des matériaux. Les câbles sont actionnés par des treuils, des embrayages et des freins contrôlés par l'opérateur pour effectuer les opérations d'excavation.



Figure I.5:Pelle mécanique (à câble) sur chenilles

I.2.2.1.3.Débit horaire d'une pelle:

De manière générale, en ne prenant pas en compte les déplacements de l'engin pendant l'excavation, le débit horaire théorique sur place est décrit par la formule suivante :

$$D = D' \cdot \frac{50}{60} \cdot \rho_{ch}; m^3/h \quad I.4$$

Avec :

D' : le débit horaire technique en m^3/h

50/60: le coefficient d'utilisation de l'excavateur

ρ_{ch} : le rendement général du chantier

En raison des défis liés à la détermination du rendement global du chantier, les exploitants préfèrent, par expérience, utiliser le coefficient d'utilisation absolu plutôt que $(50/60) \cdot \rho_{ch}$. Ainsi, le débit horaire effectif D sur place est exprimé par :

$$D = D' \cdot CUA; m^3/h \quad I.5$$

I.2.2.2.Les chargeuses:

La chargeuse est un engin de chantier qui comporte typiquement un corps automoteur articulé et un godet de grande taille à l'avant. peut effectuer un mouvement vertical et pivoter autour de son axe porteur.

Les chargeuses sont employées pour l'excavation et le transport des matériaux, qu'il s'agisse des stériles ou des minerais, vers les zones de déversement pour le remblayage ou le stockage des minerais à proximité du site d'exploitation. Il se distingue des engins à corps rigide comme les chargeuses sur chenilles et le tractopelle comme montré sur la figure I.6



Figure I.6: Chargeuse sur chenilles

Ainsi que les chargeuses sur pneus. La chargeuse sur pneus existe en version plus compacte : chargeuse rigide à roues directrices qu'utilise un système de direction à volant articulé, mini chargeuse ou encore chargeuse compacte.



Figure I.7 : Chargeuse sur pneus



Durée de cycle de la chargeuse « t_c » :

Le temps de cycle de la chargeuse est déterminé par plusieurs facteurs :

$$t_c = t_{ch} + t_{déch} + t_m + t_{ret}; s \quad I.1$$

Où :

t_{ch} : temps de chargement,

$t_{déch}$: temps de déchargement,

t_m : temps de manœuvre du chargeur,

t_{ret} : temps de retour de la chargeur à la position initiale,

Le rendement d'exploitation par poste : Q_{exp} .

Le rendement effectif du chargeur frontal est calculé selon l'équation suivante :

$$Q_{exp} = \frac{3600 \cdot E \cdot K_r \cdot T_p \cdot K_u}{T_c \cdot K_f}; m^3/p \quad I.2$$

Le rendement horaire effectif d'une chargeuse frontale est calculé selon la formule suivante:

$$D = \frac{3600 \cdot C_g \cdot N \cdot K_r}{t_{cy} \cdot k_f}; m^3/h \quad I.3$$

Où :

E : capacité du godet (C_g).

K_r : coefficient de remplissage du godet.

T_p : durée d'un poste de travail de la chargeuse $T_p = 8h$.

K_u : coefficient d'utilisation.

T_c : durée d'un cycle de chargement.

I.2.2.3. Les draglines :

Cet équipement est conçu pour excaver et transporter facilement et efficacement des matériaux lors d'une exploitation à ciel ouvert à grande échelle et constitue donc un aspect important de la gestion d'un site minier. Cette machines est montées sur des tracteurs à chenilles et comportent une superstructure capable de tourner à 360 degrés. L'entraînement des différentes parties de l'équipement est mécanique, utilisant des treuils, des embrayages et des freins, et est transmis à l'équipement à l'extrémité frontale par des câbles en acier. Le principe de fonctionnement de cette dernière est presque même que la pelle mécanique la seule différence que la pelle en butte creuse la surface verticale pour charger les camions-bennes, tandis que la dragline est généralement utilisée pour les excavations importantes.



Figure I.8 : Dragline

I.3.Transport :

Le transport joue un rôle essentiel dans l'exploitation des carrières et des mines. Son but est de déplacer les charges des fronts de travail vers les points de déchargement, tels que les stocks, les usines de traitement ou les stations de concassage pour les substances utiles, et vers les terrils pour les roches stériles. Il implique le déplacement du stérile ou du minerai depuis le point de chargement jusqu'au point de déchargement. Le coût du transport représente entre 30% et 70% du prix de revient total de l'exploitation.

I.3.1.Choix des moyens de transport :

Pour assurer un transport efficace et économique des matériaux d'un point à un autre, il est nécessaire de comprendre les capacités des différents équipements de transport et leurs domaines d'application rentables. Le choix des moyens de transport dépend de plusieurs facteurs:

- La production de la carrière.
- La distance de transport.
- Le type d'engins de chargement.
- Les caractéristiques des matériaux à transporter.
- Les conditions géologiques du gisement.
- Le mode d'ouverture du gisement.



- Les dimensions de la carrière.
- Le mode de mise en terril.

I.3.2. Types de machines de transport :

On distingue deux principaux modes de transport :

- a. Transport continu : qui inclut les convoyeurs à bande, le transport hydraulique et le transport aérien par câble
- b. transports discontinus : comprenant les locomotives et les wagons, les camions et les engins dérivés des camions, ainsi que les grues à câbles. [16]

I.3.3.1. Convoyeur à bande :

Le convoyeur à bande est un élément de transfert crucial dans les lignes de production continues. Il est largement utilisé dans divers secteurs, notamment l'exploitation minière, l'industrie métallurgique et le domaine du charbon. Les convoyeurs à bande sont spécialement conçus pour le transport de charges en vrac sur de longues distances. De nos jours, ces convoyeurs ne se limitent plus aux configurations horizontales ou inclinées, mais incluent également des courbes, des tronçons à forte inclinaison et des vitesses de fonctionnement de plus en plus élevées, tout en maintenant un transfert continu des charges sans interruption ni points de transfert. Ce type de convoyeur sera au centre de notre étude.[17]



Figure I.9: Le convoyeur à bande

I.3.3.1.1. Les avantages des convoyeurs à bande:

Les convoyeurs à bande offrent plusieurs avantages, notamment :

- Réduire la quantité d'énergie consommée.
- Réduire les opérations de maintenance.
- Une indépendance par rapport à leur environnement.
- Une réduction des coûts d'exploitation

I.3.3.1.2. Eléments principaux d'un convoyeur à bande :

Les composants de base de la bande transporteuse :



a. Tête d'entraînement :

Elle peut être de conception traditionnelle où le convoyeur à bande est équipé d'un groupe d'entraînement comprenant un tambour de commande dimensionné en fonction de la charge supportée par la bande, ainsi qu'un tambour de renvoi à l'extrémité opposée. La puissance est transmise soit par une boîte d'engrenages directement accouplée, soit par une transmission par arbre directe ou parallèle, permettant d'entraîner le tambour de commande avec un couple adapté. Ou équipée d'un tambour moteur ; dans cette configuration, le moteur, la boîte d'engrenages et les roulements forment un ensemble complet, enfermé et protégé à l'intérieur d'un carter, qui entraîne directement la bande. Cette solution élimine toutes les complications associées aux transmissions externes, telles que les couples, etc., décrites précédemment pour la conception traditionnelle. Actuellement, les tambours moteurs sont fabriqués avec des diamètres pouvant atteindre 800 mm, une puissance d'environ 130 kW et un rendement pouvant atteindre 97%. [18]

b. Tambour de commande :

La surface du tambour de commande classique ou du tambour moteur peut être laissée avec une finition normale ou revêtue de caoutchouc, dont l'épaisseur est calculée en fonction de la puissance à transmettre. Ce revêtement peut présenter des rainures en chevron, en lignes droites dans le sens de la marche, ou en forme de losange, afin d'augmenter le coefficient de frottement et de faciliter l'évacuation de l'eau de la surface du tambour. Le diamètre du tambour est déterminé en fonction de la catégorie et du type de bande, ainsi que des pressions calculées sur sa surface.

c. Tambours de renvoi :

Dans certains cas, la surface du carter peut ne pas nécessiter de revêtement, bien que dans d'autres situations, cela puisse être nécessaire. Généralement, le diamètre du carter est inférieur à celui prévu pour le tambour de commande.

d. Tambours d'inflexion ou de contrainte :

Les tambours d'inflexion ou de contrainte sont utilisés pour augmenter l'arc d'enroulement de la bande et sont généralement nécessaires dans les situations où il est essentiel de dévier la bande au niveau des dispositifs de tension à contrepoids ou des appareils de déchargement mobiles.

e. Rouleaux :

Les rouleaux offrent un soutien essentiel à la bande transporteuse, permettant ainsi une rotation fluide et sans entrave même sous des charges importantes. Leur dimensionnement adéquat est crucial pour assurer le bon fonctionnement de l'installation et une efficacité



économique optimale, étant donné qu'ils constituent une part significative de l'investissement global dans le convoyeur.

f. Stations porteuses en auge et stations-supports inférieures :

Généralement, les rouleaux porteurs sont attachés à des supports par le biais de pattes de fixation soudées sur une traverse ou un support. L'angle d'inclinaison des rouleaux latéraux varie généralement entre 20° et 45°, mais il est également possible d'atteindre des angles de 60° en utilisant une suspension de type "guirlande". Quant aux stations-supports inférieures, elles peuvent être équipées soit d'un seul rouleau sur toute la largeur, soit de deux rouleaux disposés en forme de "V" et inclinés à 10°.

g. Dispositifs de tension :

Un mécanisme de tension, tel qu'un contrepoids ou un treuil motorisé, maintient la tension adéquate de la bande transporteuse pour assurer un contact constant avec le tambour d'entraînement. Le contrepoids exerce une force constante, calculée pour éviter à la fois la surtension et le relâchement excessif de la bande. Le mouvement du dispositif est ajusté en fonction de l'élasticité de la bande pendant son fonctionnement. Un déplacement minimal est nécessaire, typiquement environ 2 % de la distance entre les axes pour une bande textile et 0,5 % pour une bande métallique.

h. Trémie :

La conception de la trémie vise à simplifier le chargement et le déversement du produit en absorbant les chocs de la charge, tout en prévenant les obstructions et les dommages à la bande transporteuse. Elle favorise un chargement instantané du produit et résout les problèmes liés à l'accumulation.

i. Dispositifs de nettoyage :

Le système de nettoyage de la bande est crucial pour réduire la maintenance, notamment en présence de produits humides ou collants, ce qui optimise la productivité du convoyeur.

j. Capots pour convoyeurs :

Les capots pour convoyeurs revêtent une importance primordiale lorsqu'il s'agit de protéger le produit transporté de l'environnement extérieur et de garantir le bon fonctionnement de l'installation.

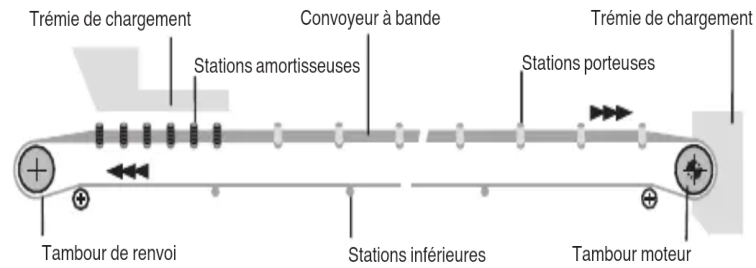


Figure I.10: Schéma des principaux éléments d'un convoyeur à bande

I.3.3.2. Transport par camion :

Un camion minier est l'équipement dont la mission (fonction) primaire est de transporter du minerai et/ou du stérile. Elle est accomplie lorsque le camion est en mouvement. Si le camion est arrêté (chargement, déversement du matériau, attente, etc.) il perd de sa fonction de transport. Lors de la définition des paramètres de travail des camions, il faut tendre vers un maximum d'utilisation.

Les camions représentent probablement les équipements les plus utilisés pour le transport dans les mines. Le coût de transport peut parfois atteindre 50 % du coût d'exploitation et 25 % du coût total (Référence Collins, 1996; Kennedy, 1990). Il est critique pour une opération minière de le minimiser. C'est un sujet qui a été traité relativement souvent dans la littérature spécialisée. Les premières applications informatiques dans l'industrie minière ont été développées pour la détermination du temps de cycle des camions.

Le transport par camion est largement utilisé dans les carrières, notamment pour les gisements et carrières qui nécessitent une exploitation sélective. Les camions ont une capacité de déversement allant de 5 à 120 tonnes, mais dans les pays modernes, des études et des recherches sont en cours pour augmenter cette capacité. Les camions chargés peuvent gravir des pentes allant jusqu'à 10 % à une vitesse optimale, tandis que les camions vides peuvent gravir des pentes allant jusqu'à 15 %. Le rayon de braquage des camions varie de 12 à 22 mètres, selon le type de pelle et la taille du camion.[19]



Figure I.11: Camion



I.3.3.2.1. les éléments principaux du camion :

Le camion se compose des éléments principaux suivant :

- a. Essieux et roues :** Les camions-bennes peuvent avoir deux ou trois essieux suspendus au châssis, avec des vérins pneumatiques à haute pression comme système d'amortissement préféré. Les roues motrices sont reliées aux essieux moteurs, tandis que la pression des pneus varie généralement entre 0,17 et 0,32 MPa, mais peut atteindre 0,35 à 0,55 MPa pour des pressions plus élevées.
- b. Châssis :** La base du camion supporte tous les éléments du véhicule et est composée de deux longerons longitudinaux reliés entre eux par des traverses pour supporter la charge de choc.
- c. Mécanisme de culbutage :** Le mécanisme de basculement est généralement actionné à l'aide de vérins hydrauliques à double effet, contrôlés pour maintenir la charge à l'inclinaison désirée. Ils sont rapidement ramenés en position "MAINTENANCE" lorsque la benne est en cours de levage, ce qui permet de renvoyer la pression accrue à l'extrémité opposée pour éviter les dommages aux vérins de levage.
- d. Le moteur :** Le moteur fonctionne selon un cycle à quatre temps, où le piston se trouve en haut de sa course au moment de la combustion, poussant ainsi le piston vers le bas avec force. Pendant cette descente, le piston dépasse le point médian de sa course. Les soupapes d'échappement s'ouvrent, permettant aux gaz de s'échapper de la chambre de combustion, tandis que le piston continue sa descente jusqu'au point le plus bas, découvrant ainsi les orifices d'admission d'air.
- e. Dispositif de freinage :** Les systèmes de freinage peuvent être hydrauliques ou pneumatiques, agissant sur toutes les roues motrices et directrices du véhicule.
- f. Poste de commande :** Il comprend différents boutons pour commander tous les actionneurs prévus des différents mécanismes du camion ainsi que le siège du conducteur.
- g. La benne :** La benne est spécialement conçue pour supporter des charges lourdes, notamment dans les applications en carrières et mines. Elle est équipée de plaques de fond en alliage d'acier pour résister à l'usure et aux impacts, ce qui optimise sa durabilité. Sa hauteur, largeur et longueur sont dimensionnées pour permettre le chargement au-dessus.

Avantages du transport par camion :

- Flexibilité d'utilisation et facilité d'adaptation dans de nombreux types d'exploitation.
- Grande capacité de transport par rapport à certains autres moyens.
- Capacité à surmonter les pentes.



- Maniabilité.

I.3.3.2.2. Choix du type de camion :

Dans les opérations extérieures, l'utilisation de camions de grande capacité est devenue courante. Il s'agit de réduire les coûts d'exploitation, de main d'œuvre, d'entretien et de réparation. De plus, la plus grande capacité de chargement permet de réduire le facteur de vide. Par conséquent, il est devenu nécessaire de choisir judicieusement le type de camion en fonction de la distance de transport et de la relation entre la capacité du godet de la pelle et la capacité de la carrosserie du camion.

1. Pour une distance de transport allant jusqu'à 1,5 km, le choix du type de camion doit être déterminé en fonction de la relation suivante :

$$V_b = (4 : 6).E; m^3 \quad \text{I.6}$$

2. Pour une distance de 1,5 à 5 km, le choix du camion doit être basé sur la relation suivante :

$$V_b = (6 : 10).E; m^3 \quad \text{I.7}$$

3. Pour une distance de 5 à 7 km et plus, le choix du camion doit être déterminé en fonction de la relation suivante :

$$V_b = (8 : 12).E; m^3 \quad \text{I.8}$$

Où :

V_b : le volume du camion à choisir (m^3)

E : la capacité du godet de l'excavateur en (m^3)

NB : les chiffres 4, 6, 10, 12 indiquent les nombres optimums de godet de l'excavateur.

I.3.3.2.3. Rendement du camion et leur nombre :

En fonction de la production requise et de la période de temps, le nombre de camions dans la carrière est déterminé, il est donc nécessaire d'avoir le nombre de camions suivant :

$$N_c = \frac{t_{par}}{t_{ch}}; camion \quad \text{I.9}$$

Où :

t_{par} : Durée de parcours d'un camion, min ;

t_{ch} : Durée de chargement d'un camion, min ;

La durée de parcours se calcule comme suit :

$$T_{par} = t_{ch} + t_r + t_d + t_m \quad \text{I.10}$$



Où :

$t_r + t_d + t_m$: sont respectivement durée du trajet (en charge et vide), de déchargement et de manœuvres, min.

D'après ces expressions:

$$N_c = \frac{t_{tr} + t_d + t_m}{t_{ch}} + 1; \text{camion} \quad \text{I.11}$$

La durée de chargement d'un camion se détermine comme suite :

$$t_{ch} = n_g \times t_c; \text{min} \quad \text{I.12}$$

n_g : Nombre de godet déversés dans la benne du camion ;

t_c : Durée d'un cycle de l'engin de chargement ; min ;

Nombre de godets se détermine comme suit :

$$n_g = \frac{Q_{ch} \times K_f}{E \times \gamma \times K_r}; \text{go det s} \quad \text{I.13}$$

Où :

Q_{ch} : capacité de la charge du camion ; par tonne

K_f : coefficient de foisonnement des roches dans le godet ;

E : capacité du godet de la chargeuse ; m³

γ : poids volumique de la roche ; t/m³

K_r : coefficient de remplissage du godet de la chargeuse ;

Nombre de cycle se détermine comme suit :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{t_{par}}; \text{cycle/p} \quad \text{I.14}$$

Où :

t_p : durée d'un poste de travail : (8h).

T_{par} : La durée de parcours ; min

Rendement du camion se détermine comme suit :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b; t/p \quad \text{I.15}$$

Où :

C_b : capacité de benne par tonne ;

Nombre total de camions avec réserves :

Cette réserve assure la continuité de la production sur le chantier. Généralement, on prévoit au moins un camion en réserve pour chaque six camions en activité. Cette réserve est ajustée en fonction de la durée d'exploitation des camions. Ainsi, le nombre total de camions avec réserve sera :



$$N_{c.t} = \frac{N_c}{(0.7:0.8)} \quad \text{I.16}$$

Le nombre de camions en réserve sera :

$$N_{c.r} = N_{c.t} - N_c \quad \text{I.17}$$

I.4. Rendement général du chantier :

Calculer avec précision le rendement global du chantier est un processus complexe et délicat. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte les coefficients d'utilisation effective (CUE) et de mise à disposition (CMD) des engins miniers, qui sont déterminés à partir de différentes catégories d'heures sur une période de référence. Cette période de référence peut être définie selon un poste, une journée, une semaine, un mois ou une année. Plutôt que d'utiliser les rendements horaires et globaux du chantier, cette approche permet une analyse plus détaillée en décomposant la période de référence en différentes catégories d'heures.[20]

I.4.1. Heures théoriques ou possibles, HP :

Elles représentent le nombre total d'heures possibles dans une période donnée :

Un poste= 8 heures.

Un jour= 24 heures.

Un mois =30 jours= 720 heures (ou 8760/12=730 heures).

Une année = 365 jours = 8 760 heures...

Ces heures sont décomposées en deux classes :

- Les heures d'activité.
- Les heures d'inactivité.

I.4.1.1. Heures d'activité, HACT :

Il s'agit de toutes les heures de prestations actives d'exploitation et de maintenance quelle que soit la période de référence considérée.

Elles sont décomposées en deux classes principales d'heures :

- Heures de mise à disposition, HMD.
- Heures de maintenance, HM.

A) Heures de mise à disposition, HMD :

Il peut être défini comme les heures pendant lesquelles les machines sont disponibles pour le service des opérations. Ou dans une autre définition, c'est le total d'heures garanties par le service de maintenance opérationnelle pour réaliser la production qui était prévue.

Elles sont décomposées en deux classes d'heures :



- Heures d'utilisation réelle ou effective.
- Heures improductives.

a) Heures d'utilisation réelle ou effective, HUE :

Il s'agit des heures de travail réelles des machines affectées à l'opération.

b) Heures improductives, HIMP :

Il peut être défini comme les heures pendant lesquelles les machines disponibles pour le processus ne travaillent pas en production.

On prend par exemple des heures :

- Visite de la division de maintenance.
- Manque du courant ou panne sèche.
- Déplacement des engins d'un chantier à l'autre.
- Ravitaillement en carburant.
- Changement de poste.
- Attente poste.
- Minage.
- Autres arrêts divers indépendants de l'état de l'engin.

B) Heures de maintenance, HM :

Il peut être défini comme les heures pendant lesquelles les machines sont disponibles pour la maintenance et comprend plusieurs périodes telles que l'entretien, la réparation, la remise à neuf ou les retards dus à la fourniture de pièces de rechange.

I.4.1.2. Heures d'inactivité, HINACT :

Il peut être défini comme les heures pendant lesquelles les machines ne sont pas en fonctionnement ou en maintenance.

Cette catégorie comprend les heures de réserve gérées par la direction du siège social en cas de surplus du parc de machines. Des machines de rechange sont disponibles pour la maintenance.

La Connaissance de toutes ces classes nous a aidé de définir les coefficients suivant :

- le coefficient de mise à disposition.
- le coefficient d'utilisation effective.
- le coefficient d'utilisation absolue.



Tableau I.1 : les classes d'heures.[20]

Classes d'heures principales (à utiliser) obligatoirement pour le calcul des coefficients).			Catégories d'heures (à utiliser facultativement).			
			1 ^{er} niveau : terminologie obligatoire	2 ^{eme} niveau : à définir par la société.		
Période de référence.	Heures possibles.	Heures d'inactivité.				
			Heures de maintenance.	Entretien préventif.	-visites systématiques. -entretien périodique. -réparation (révisions partielles). -modification/amélioration.	
				Rénovation.	Démontage complet de l'engin.	
				Dépannage.	-intervention sur chantier. -intervention au garage.	
				Accident.		
				Attentes diverses.	-attentes manques sous-ensembles. -attentes manques rechanges. -attentes manque Atelier Tous sièges (ATS). -attentes manque personnel entretien. -attentes transport ou remorquage, ...	
				Heure de chômage	Temps morts.	Minage.
					Réserves.	Abondance de l'équipement disponible.
					Divers.	Attente chauffeurs, panne sèches.
					Changementes postes.	-Prise en charge. -ravitaillement.
				Heures d'activité.	Heures de régie.	-nettoyage chantier, pistes. -préparation chantier DEM. -Dépannage remorquages. -services généraux Siège.
			Heures de translation.		-Déplacement entre chantier et garage -Déplacement entre carrières.	
			Heures de travail.		Production.	

**a. Coefficient de mise à disposition, CMD :**

C'est le rapport entre les heures de mise à disposition et les heures possibles.

$$CMD = \frac{HMD}{HP} 100; (\%) \quad \text{I.18}$$

b. Coefficient d'utilisation effective, CUE :

C'est le ratio entre les heures d'utilisation effective de l'engin et les heures de mise à disposition.

$$CUE = \frac{HUE}{HMD} 100 \quad \text{I.19}$$

c. Coefficient d'utilisation absolu, CUA :

C'est le résultat de la multiplication des coefficients de mise à disposition et d'utilisation effective.

$$CUA = CMD \times CUE = \frac{HMD}{HP} \times \frac{HUE}{HMD} = \frac{HUE}{HP} 100; (\%). \quad \text{I.20}$$

$$CUA = \frac{HUE}{HP} 100; (\%).$$

Ainsi, le coefficient d'utilisation absolu est le rapport entre les heures d'utilisation effective de l'engin et le nombre total d'heures possibles pendant une période de référence donnée.

I.5. Combinaison des opérations de chargement et transport :

Dans la plupart des mines actuelles, la combinaison du chargement et du transport constitue la majeure partie de la production. L'objectif principal est d'optimiser l'utilisation des capacités de production des équipements de chargement et de transport afin de minimiser les coûts d'exploitation.

En pratique, il est couramment admis qu'un équipement de transport, qu'il soit une benne rigide ou articulée, soit chargé en trois à six passes. Par conséquent, nous commençons par déterminer les capacités des engins de chargement, puis nous sélectionnons les engins de transport en multipliant la capacité des engins de chargement choisis par trois à six.

Pour des raisons de praticité, les fabricants d'engins de chargement et de transport offrent une gamme variée de tandem engins de chargement-engins de transport. Cette gamme est complétée par des engins de terrassement, ce qui permet d'optimiser les opérations minières.



Par conséquent, les ingénieurs miniers évaluent la capacité des machines de chargement en fonction de la production requise. Ces machines de chargement sont ensuite couplées à des engins de transport, et complétées par des engins de terrassement, afin d'assurer une production optimale.

Un choix inapproprié d'engins de chargement aura un impact sur les résultats de la production. Ceci est également vrai pour les engins de transport et de terrassement. Dans ce scénario, même avec un nombre adéquat d'engins disponibles, les coefficients d'utilisation seront faibles.

Pour sélectionner des machines sur les sites miniers, les étapes suivantes doivent être suivies :

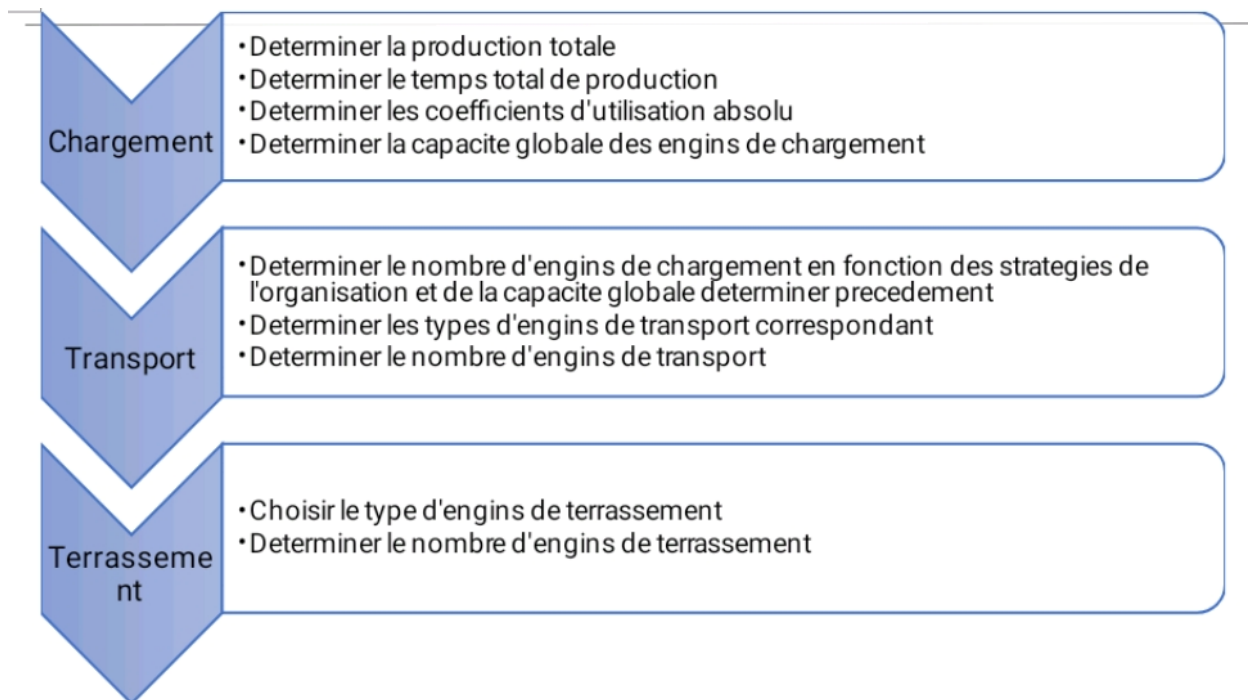


Figure I.12 : Procédure de détermination de la flotte de production d'une mine.



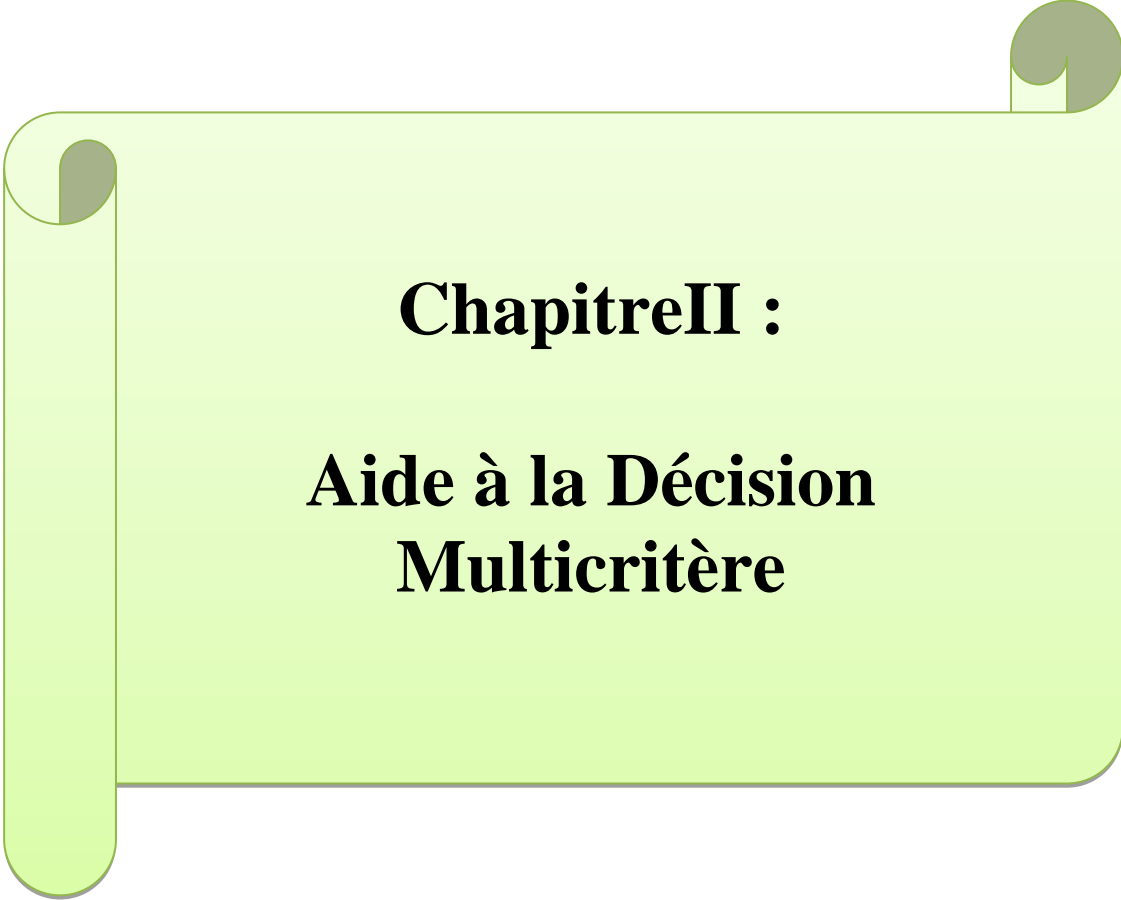
I.6. Conclusion :

La gestion efficace du chargement et du transport dans les mines est essentielle pour assurer une exploitation minière rentable et efficace. La combinaison harmonieuse de ces processus constitue le cœur de la production minière.

L'objectif principal est d'optimiser l'utilisation des équipements disponibles pour réduire les coûts d'exploitation tout en maximisant la production.

En conclusion, une planification stratégique et une gestion efficace des opérations de chargement, de transport et de terrassement sont cruciales pour garantir le succès à long terme des activités minières. En suivant des procédures bien définies et en faisant des choix éclairés, les exploitants miniers peuvent améliorer leur efficacité opérationnelle et leur rentabilité tout en minimisant les risques et les perturbations.

Le chapitre suivant aborde les méthodes d'aide à la décision multicritères, nécessaires pour évaluer et comparer des alternatives complexes. Nous explorerons les principales approches théoriques et pratiques pour prendre des décisions éclairées face à des critères multiples et souvent contradictoires.



ChapitreII :
Aide à la Décision
Multicritère

II.1. Introduction :

Dans divers domaines, les décideurs sont confrontés à des défis complexes qui exigent souvent une analyse approfondie. La méthode de prise de décision multicritères (MCDM) est un outil essentiel dans ces contextes, puisqu'elle intègre diverses dimensions telles que les aspects techniques, économiques, environnementaux, sociaux, politiques et réglementaires. Cette complexité découle de la nécessité pour les décideurs de tenir compte des objectifs et des critères variés des différentes parties prenantes, ainsi que des risques inhérents aux données spécifiques à leur domaine.

Par conséquent, la MCDM trouve des applications variées, notamment dans des secteurs tels que l'exploitation minière, la planification stratégique, la gestion de projet, l'analyse d'investissement, et bien d'autres encore.

Dans ce chapitre, nous découvrirons la méthode de prise de décision multicritère et donnerons un aperçu de certaines de ses techniques bien connues et célèbres. Mais l'accent sera mis sur la technologie AHP et la technique WASPAS.[21]

II.2. Définition de L'aide à la décision multicritères :

L'aide à la décision implique l'activité de fournir des réponses aux questions posées par un intervenant dans un processus décisionnel. Cette aide repose sur des modèles explicites, bien que non nécessairement entièrement formalisés. Son objectif est d'éclairer la décision et, idéalement, de recommander ou de promouvoir un comportement cohérent avec les objectifs et les valeurs du décideur.[22]

MCDM est la composition d'un ensemble de critères multiples, d'un ensemble d'alternatives et de leur comparaison d'une manière ou d'une autre. Elle est employée dans des situations où les capacités cognitives de l'individu sont limitées. Il est impossible pour une personne d'analyser toutes les informations disponibles, de comprendre toutes les situations possibles et d'optimiser son choix. En utilisant cette méthode, le décideur peut prendre une décision cohérente avec ses exigences et ses objectifs, malgré ces limites cognitives.

II.3. Un bref historique de la méthode MCDM :

La méthode MCDM (Multi-Criteria Decision Making) a émergé dans les années 1960 en réponse à la nécessité de prendre des décisions dans des environnements complexes impliquant plusieurs critères contradictoires. L'une des premières études de recherche sur la prise de décision multicritère a été développée par Benjamin Franklin lorsqu'il a publié ses recherches sur le concept d'algèbre morale. Plusieurs scientifiques empiriques et théoriques ont travaillé sur les méthodes MCDM pour examiner la capacité de modélisation

mathématique de ces méthodes depuis les années 1950 afin de fournir un cadre pouvant aider à structurer les problèmes de prise de décision et à générer des préférences à partir d'alternatives.[7]

Depuis lors, la méthode MCDM a connu un développement continu, avec de nombreuses extensions et applications dans divers domaines tels que la gestion, l'économie, l'ingénierie, et la recherche opérationnelle. Elle est devenue un outil indispensable pour aider les décideurs à évaluer et à comparer les alternatives en prenant en compte des critères multiples et parfois conflictuels.

II.4. Objectif de l'aide à la décision :

En effet, l'objectif ultime de l'aide à la décision n'est pas de substituer le décideur dans le processus décisionnel, mais plutôt de lui fournir des informations pertinentes pour qu'il puisse les comprendre, ainsi que des solutions alternatives et les conséquences associées à chaque option. Ceci lui permet de prendre la décision la plus appropriée en toute connaissance de cause.

II.5. Notion de critère :

Un critère, qu'il soit objectif ou attribut, peut être défini comme une fonction opérant sur l'ensemble des alternatives, ayant pour valeurs des éléments d'un ensemble totalement ordonné. Il reflète les préférences de l'utilisateur du point de vue spécifique que le critère cherche à modéliser.

Vincke définit, un critère est une fonction g définie sur l'ensemble des actions, prenant ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et représentant les préférences du décideur selon un point de vue particulier. Lorsque le problème implique plusieurs critères, nous les noterons $g_1; \dots; g_n$. Par la suite, nous utiliserons indifféremment la notation g_j ou j pour désigner un critère spécifique. L'évaluation d'une action selon le critère j est notée $g_j(a)$.

II.6. Matrice multicritères :

La matrice multicritères est un outil pour les prises de décision collectives qui prennent en compte des perspectives divergentes en se basant sur une comparaison objective de différentes idées. Elle offre une alternative aux méthodes de décision traditionnelles qui reposent sur la définition d'une seule fonction. Le choix de la solution découle d'une comparaison rationnelle entre les options et les critères définis. Les interprétations subjectives sont évitées car la négociation se concentre sur la pondération des critères plutôt que sur l'analyse des solutions elles-mêmes.[23]

II.7. Étapes générales du MCDM :

Le processus de prise de décision pour résoudre les problèmes MCDM comporte généralement trois étapes :

II.7.1. structurer le problème de décision :

Cette phase initiale vise à planifier les types d'actions à entreprendre pour structurer efficacement le problème de décision Pour chacune des activités suivantes :

- Identifier le(s) décideur(s).
- Définir le(s) but(s).
- Analyser les alternatives réalisables qui seront évaluées.
- Déterminer les critères d'évaluation des conséquences de chaque alternative.

À ce stade, les activités mentionnées sont similaires pour toutes les méthodes MCDM. Elles fournissent des informations qui servent ensuite de base pour déterminer le type de méthode MCDM applicable ou pour développer une nouvelle méthode afin de résoudre le problème.

II.7.2. Détermination et application de la méthode MCDM :

Avant de choisir une méthode MCDM, il est crucial que le problème de décision soit d'abord structuré, et que l'applicabilité de la méthode au problème soit évaluée. Cette étape peut englober les activités suivantes :

- Déterminer le poids de chaque critère par rapport à l'objectif principal, et dresser la liste des critères à prendre en considération.
- Évaluer la préférence de chaque alternative par rapport à chaque critère, en établissant un tableau des performances.
- Calculer les notes globales pondérées des alternatives.
- Classer toutes les alternatives réalisables en fonction de leur score pondéré en agrégeant les performances évaluées.

II.7.3. Détermination de la recommandation finale MCDM :

Plus la note totale pondérée est élevée, plus l'alternative est préférable. Les résultats obtenus doivent être minutieusement examinés, en réalisant une analyse de sensibilité qui peut être utile pour répondre aux exigences du choix souhaité.

II.8. Classification des techniques MCDM :

La prise de décision multicritère (MCDM) comprend deux grandes catégories : la prise de décision multi-attributs (MADM) et la prise de décision multi-objectifs (MODM). La MADM implique d'évaluer chaque alternative par rapport à un ensemble d'objectifs pour faciliter la sélection. Les attributs servent de base à la comparaison des alternatives et facilitent ainsi la sélection.

Les méthodes MADM (Multi Attribute Decision Making) évaluent des alternatives discrètes et englobent un large éventail de techniques pour évaluer les problèmes de décision caractérisés par de nombreux attributs divers, comprenant à la fois des données cardinales et ordinales, ainsi que des préférences quant à l'importance relative des critères d'évaluation.

L'attribution de pondérations aux critères dans le cadre des méthodes MADM revêt une importance cruciale, bien qu'elle ne soit pas toujours économiquement explicite, car elle joue un rôle essentiel en fournissant une opportunité de représenter les aspects réels de la prise de décision, tels que la structure des préférences. Cette catégorie d'approches MADM est généralement divisée en trois grandes catégories : les méthodes élémentaires, les méthodes de synthèse unique et les méthodes de surclassement.

Les approches MODM (Multi-Objective Decision Making) évaluent les alternatives de manière continue et abordent les problèmes d'optimisation objective. La méthode utilisée dans le cadre des approches MODM vise à évaluer les conflits entre plusieurs objectifs et à rechercher la solution optimale.

II.9. Techniques du MCDM :

La technologie MCDM est considérée comme une technologie qui aide à choisir la meilleure alternative parmi un groupe d'alternatives et de critères. Pour ce faire, nous avons recours à différentes technologies MCDM, car chacune d'elles a ses avantages et ses inconvénients. La technologie est choisie en fonction des exigences du décideur. Parmi ces nombreuses technologies, nous citons les plus importantes : [23]

En anglais :

- AHP (Analytic Hierarchy Process)
- TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution).
- ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality).
- VIKOR (Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje).

- MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis).
- COPRAS (Complex Proportion Assessment Method).
- PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations).
- WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment).

Et ce n'est pas tout, car il existe d'autres techniques dont le décideur ne peut se passer.

II.9.1. AHP (Analytic Hierarchy Process) :

II.9.1.1. Contexte général :

AHP signifie Analytic Hierarchy Process, ce qui se traduit en français par Processus Hiérarchique d'Analyse. C'est une méthode de prise de décision multicritère développée par Thomas L. Saaty dans les années 1970. L'AHP permet de structurer et de résoudre des problèmes complexes en décomposant le processus décisionnel en plusieurs niveaux hiérarchiques.

Il utilise des comparaisons par paires pour évaluer les priorités et les préférences des critères et des alternatives, puis agrège ces évaluations pour parvenir à une décision finale. L'AHP est largement utilisé dans de nombreux domaines, notamment la gestion, l'ingénierie, la finance et la planification stratégique.[24]

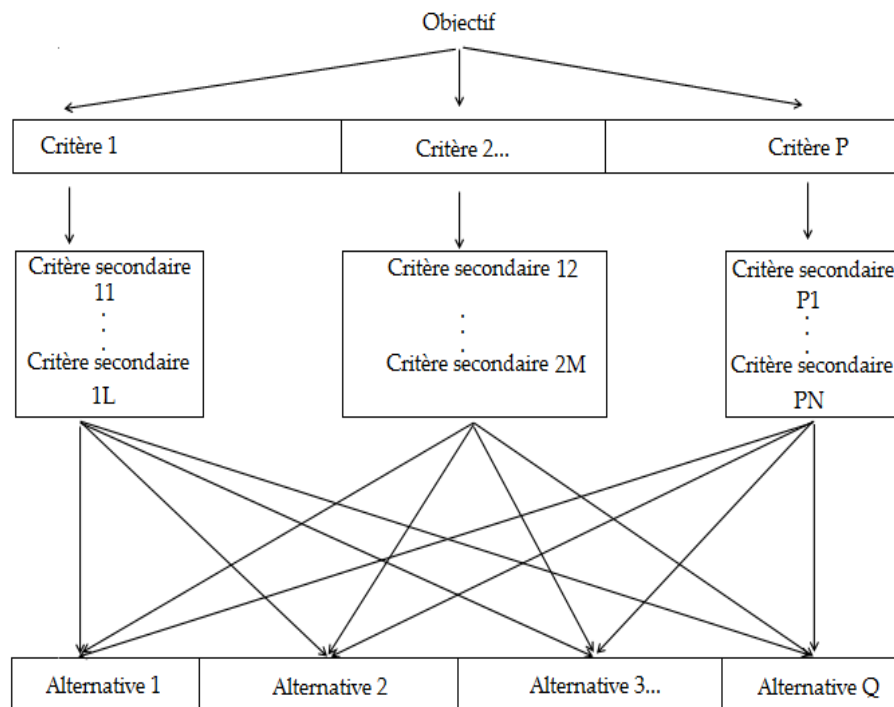


Figure II.1 : Hiérarchie générale de la méthode AHP

II.9.1.2. Étapes pour appliquer la technique AHP:

Pour appliquer cette technologie, nous suivons les étapes suivantes :

Étape 01: Le processus de prise de décision est structuré en plusieurs composants clés organisés selon une hiérarchie, incluant : l'objectif, les critères principaux, éventuellement les critères secondaires, et les alternatives. Cette phase représente la partie la plus significative et innovante du processus de prise de décision.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \vdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \tag{II.1}$$

Étape 02 : Les données sont agrégées par des experts et des décideurs en suivant la structure hiérarchique. La normalisation de la matrice de décision est réalisée en utilisant l'équation suivante :

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \tag{II.2}$$

Les experts peuvent évaluer ces comparaisons en termes d'égalité, de moyenne, de forte, de très forte ou d'absolue.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \vdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mm} \end{bmatrix} \tag{II.3}$$

Étape 03 : Dans cette section, les comparaisons par paires entre les différents critères sont représentées dans une matrice carrée de taille 1. Ensuite, le vecteur colonne W, représentant les poids des critères, est calculé.



$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} \quad w_i = \frac{\sum_{j=1}^m b_{ij}}{m} \quad \text{II.4}$$

Étape 04 : La valeur propre λ est déterminée en calculant la moyenne arithmétique des valeurs E, comme indiqué dans l'équation.

$$E = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1.2.3 \dots m)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{m} \quad \text{II.5}$$

Tableau II.1 : Échelle de préférence de Saaty.

Degree d'importance	Definitions	Explications
1	Une importance égale	Deux facteurs contribuent également à objectif
3	Un peu plus important	Expérience et jugement légèrement favoriser l'un par rapport à l'autre
5	plus important	Expérience et jugement fortement favoriser l'un par rapport à l'autre
7	Beaucoup plus important	Expérience et jugement très forts privilégier l'un par rapport à l'autre. Son importance est démontré dans la pratique
9	Absolument plus important	Les preuves en faveur d'un seul par rapport au autre est de la plus haute validité possible
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires	Quand un compromis est nécessaire

Étape 05 : Calculez la note globale de performance prioritaire représente l'indicateur de cohérence (IC).

$$IC = \frac{\lambda - m}{m - 1} \quad \text{II.6}$$

Le rapport de cohérence (CR) peut également être calculé par la formule suivante :

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad \text{II.7}$$

Les données obtenues sont considérées comme cohérentes si le rapport de cohérence (CR) est inférieur à 10 %. Cependant, si le CR est supérieur ou égal à 10 %, les résultats ne sont pas concluants, ce qui indique que la matrice de comparaison doit être mise à jour.

II.9.1.3. Avantages de AHP :

Sa structure simple permet de répondre efficacement à la complexité des problèmes réels. Elle s'intègre aisément à diverses approches qualitatives et quantitatives, telles que la programmation linéaire, la programmation d'objectifs, l'analyse des données par enveloppement, la théorie des jeux, l'analyse conjointe et l'analyse SWOT.

Il permet aux décideurs d'incorporer leur expérience et leurs intuitions pour déterminer l'importance relative d'un attribut par rapport à un autre, renforçant ainsi leur confiance dans les résultats obtenus grâce à la technique.

II.9.1.4. Limites de l'AHP :

L'obtention d'un consensus sur les opinions des experts peut parfois être difficile en raison du nombre important de comparaisons par paires impliqué.

Cette méthode exige des données fiables fondées sur l'expérience, les connaissances et le jugement, qui peuvent varier selon chaque décideur, car elles sont assez subjectives. Cependant, elle ne prend pas en compte l'incertitude. Cela peut prendre du temps, surtout avec un grand nombre d'attributs et d'alternatives à considérer.[25]

II.9.2. TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) :

II.9.2.1. Contexte général :

TOPSIS, un outil d'aide à la décision multicritère développé par Yoon et Hwang, a été évalué par des décideurs à divers niveaux. Il utilise une approche compensatoire d'agrégation pour identifier la meilleure alternative parmi plusieurs options. Cette méthode repose sur l'idée que la meilleure alternative minimise sa distance géométrique par rapport à

une solution idéale positive tout en maximisant sa distance par rapport à toute solution idéale négative.

Les alternatives sont initialement évaluées en fonction de leur proximité avec une solution idéale, souvent une solution théorique qui excelle dans tous les aspects, même si elle peut être pratiquement inatteignable. Ainsi, l'alternative qui se rapproche le plus de cette solution idéale est mieux notée que celles qui affichent une similarité moindre.

Essentiellement, l'approche TOPSIS implique de mesurer la distance de chaque alternative par rapport à la solution idéale, puis de sélectionner la meilleure alternative en fonction de cette distance. Cette méthodologie globale implique la comparaison d'un ensemble d'alternatives en fonction des pondérations attribuées à chaque critère d'évaluation. Ensuite, les valeurs normalisées de ces scores sont calculées et utilisées pour évaluer la distance géométrique par rapport à la solution idéale.[26][27]

II.9.2.2. Étapes pour appliquer la technique TOPSIS :

La technique TOPSIS est généralement appliquée en suivant ces étapes :

- **Étape 01** : Établir une matrice de performance.
- **Étape 02** : Normaliser la matrice de décision.
- **Étape 03** : Calculer la matrice de décision normalisée pondérée.
- **Étape 04** : Déterminer les solutions idéales positives et négatives.
- **Étape 05** : Calculer les mesures de séparation.
- **Étape 06** : Calculer la proximité relative de la solution idéale.
- **Étape 07** : Classez l'ordre de préférence.

II.9.3. ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality) :

II.9.3.1. Contexte général :

La méthode ELECTRE, initialement proposée par Bernard Roy et son équipe chez SEMA Conseil, a évolué au fil du temps pour inclure différentes versions telles que ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS, ELECTRE TRI et autres. Il a été appliqué avec succès dans divers domaines tels que l'alimentation, les soins de santé, la gestion des infrastructures, la finance, la gestion des ressources en eau et d'autres domaines.

Cette méthode est classée comme méthode d'amélioration du processus de prise de décision. Il se compose de deux étapes principales : la première consiste à classer les

relations pour comparer différentes solutions alternatives par paires, tandis que la deuxième étape génère des recommandations basées sur la première étape.

La méthode ELECTRE peut être utilisée pour différents types de décisions, notamment la sélection, la priorisation ou le triage, sur la base des recommandations formulées lors de la première étape. Il est généralement appliqué pour identifier les solutions inacceptables parmi un ensemble de solutions, en utilisant le concept de classement des alternatives en fonction d'un ensemble d'attributs ou de critères.[28]

Une solution est considérée comme dominante par rapport aux autres solutions si elle excelle sur certains critères et est au moins aussi bonne que d'autres solutions sur d'autres critères. Cette classification est basée sur des comparaisons par paires, où une corrélation supérieure entre deux solutions indique qu'une alternative peut être considérée comme nettement meilleure que l'autre même si elle ne la surpasse pas quantitativement.

II.9.3.2. Étapes pour appliquer la technique ELECTRE :

Cette technique est généralement appliquée dans les étapes suivantes :

- **Étape 01** : Normalisation de la matrice de décision.
- **Étape 02** : Pondération de la matrice de décision normalisée.
- **Étape 03** : Déterminer les ensembles de concordance et de discordance.
- **Étape 04** : Construire les matrices de concordance et de discordance
- **Étape 05** : Déterminer les matrices de dominance de concordance et de discordance.

II.9.4. VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) :

II.9.4.1. Contexte général :

La méthode de prise de décision multicritère VIKOR, introduite par S. Opricovic en 1979, a été baptisée en 1990 à partir du serbe : VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, traduisible par Solution d'Optimisation et de Compromis Multicritères. Elle facilite la prise de décision stratégique dans divers domaines tels que le social, l'économique et l'environnemental en hiérarchisant les alternatives et en sélectionnant la meilleure solution de compromis en tenant compte de critères contradictoires.

VIKOR vise à déterminer la solution optimale qui minimise les compromis, prenant en considération des facteurs variés comme le coût, la durée et les retours escomptés. Cette approche implique de classer toutes les solutions alternatives afin d'identifier le compromis le plus avantageux. Dans les situations réelles où les critères sont contradictoires, des solutions

Pareto-optimales se manifestent, nécessitant une analyse holistique pour déterminer la solution dominante offrant le meilleur compromis global.[29]

II.9.4.2. Étapes pour appliquer la technique VIKOR :

Cette technique est généralement appliquée dans les étapes suivantes :

- **Étape 01** : Identification des alternatives.
- **Étape 02** : Détermination des critères d'évaluation.
- **Étape 03** : Attribution des poids aux critères.
- **Étape 04** : Normalisation des données.
- **Étape 05** : Calcul du score de chaque alternative.
- **Étape 06** : Calcul de la distance de chaque alternative par rapport à la solution idéale et la solution anti-idéale.
- **Étape 07** : Calcul du score global de chaque alternative.
- **Étape 08** : Classement des alternatives en fonction de leur score global.

II.9.5. MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis) :

II.9.5.1. Contexte général :

La méthode d'optimisation multi-objectifs basée sur l'analyse de ratios (MOORA), développée par Brauers et Zavadskas en 2006, s'est révélée efficace dans de nombreux domaines tels que la sélection des matériaux, l'évaluation des performances dans le secteur immobilier, la sélection des entrepreneurs, la conception, la robotique, le personnel, contrôle qualité et planification des systèmes. Production, sites, entreprises, gestion des déchets médicaux et bien d'autres domaines. [30]

Dans sa méthode de fonctionnement, MOORA s'appuie sur l'utilisation d'un système de ratio dans lequel chaque réponse à une alternative par rapport à un objectif est comparée à un dénominateur qui représente toutes les alternatives pour cet objectif spécifique.

II.9.5.2. Étapes pour appliquer la technique MOORA :

Cette technique est généralement appliquée dans les étapes suivantes :

- **Étape 01** : Identification des alternatives et des critères.
- **Étape 02** : Développer la matrice de décision initiale.
- **Étape 03** : Le processus implique la construction d'un système de ratio où chaque mesure de performance d'une alternative sur un critère donné est comparée à un dénominateur spécifique représentant l'ensemble des alternatives pour ce même critère.

- **Étape 04** : Calculer les valeurs d'évaluation de toutes les alternatives.
- **Étape 05** : Déterminer le classement complet des alternatives en fonction des valeurs.

II.9.6. COPRAS (Complex Proportion Assessment Method) :

II.9.6.1. Contexte général :

La méthode COPRAS, élaborée en 1996 par les chercheurs Zavadskas et Kaklauskas de l'Université technique Gediminas de Vilnius, propose une approche de normalisation où tous les indicateurs sont agrégés en un seul critère quantitatif, appelé la valeur du critère de la méthode. Cette méthode reconnaît la relation directe et proportionnelle de la priorité.

La méthode d'évaluation proportionnelle complexe (COPRAS) est largement reconnue comme l'une des approches les plus utilisées en MCDM (Multi-Criteria Decision Making) pour classer différentes alternatives en fonction de divers critères. Cela se fait en utilisant les pondérations des critères correspondants et en évaluant le degré d'utilité des alternatives.[31]

Dans le processus de sélection de la meilleure alternative, COPRAS prend en compte à la fois les solutions idéales et anti-idéales. Cette méthode suppose une relation directe et proportionnelle dans la définition de l'importance et du degré d'utilité des différentes versions étudiées par rapport à un ensemble de critères, ce qui permet une évaluation efficace des alternatives.

COPRAS offre plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes MCDM telles que EVAMIX, TOPSIS, VIKOR et AHP. Ces avantages comprennent des temps de calcul réduits, un processus de calcul simple et transparent, ainsi qu'une adoption plus aisée pour une variété de problèmes de décision. De plus, les décisions résultant de COPRAS sont souvent plus efficaces et moins biaisées que celles obtenues par TOPSIS et la pondération additive simple

II.9.6.2. Étapes pour appliquer la technique COPRAS :

Cette technique est généralement appliquée dans les étapes suivantes :

- **Étape 01** : Sélectionner l'ensemble des critères les plus importants et décrire les alternatives.
- **Étape 02** : Construire la matrice de décision initiale.
- **Étape 03** : Normaliser la matrice décisionnelle.

- **Étape 04** : Établir les pondérations des critères en utilisant des techniques telles que les comparaisons par paires, la méthode Delphi et l'approche entropique.
- **Étape 05** : Calculer les sommes des critères de maximisation et de minimisation, pour chaque alternative.
- **Étape 06** : Calculer les sommes des critères minimisants, pour chaque alternative.
- **Étape 07** : Calcul du poids relatif de chaque alternative.
- **Étape 08** : Déterminer l'ordre de priorité des alternatives en fonction de leur poids relatif, et les alternatives avec un poids relatif plus élevé ont un rang plus élevé.

II.9.7. PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) :

II.9.7.1. Contexte général :

La recherche opérationnelle (RO) a connu une période de croissance rapide, notamment dans le domaine de la prise de décision multicritère (MCDM). Au fil des décennies, de nombreuses nouvelles méthodes de prise de décision ont émergé, accompagnées d'améliorations constantes des méthodes existantes. Les problèmes de MCDM impliquent généralement la sélection, le classement ou la priorisation des alternatives parmi un ensemble de solutions potentielles.[32]

Ces approches visent principalement à identifier la solution optimale, qui surpasse les autres alternatives tout en minimisant les compromis. Un outil de prise de décision efficace doit non seulement intégrer une gamme de critères externes, mais également refléter fidèlement les préférences du décideur en leur accordant l'importance appropriée.

La méthode PROMETHEE (Méthode d'Organisation du Classement de Préférence pour Enrichment Evaluations), introduite par Brans en 1982, a été étendue ultérieurement par Vincke et Brans en 1985. Elle figure parmi les méthodes les plus récentes en Analyse Multicritère de Décision (MCDA). PROMETHEE repose sur une approche de surclassement qui classe et sélectionne une ou plusieurs actions alternatives parmi l'ensemble des solutions envisageables, en tenant compte de différents ensembles de critères souvent contradictoires.

Cette technique évalue les alternatives en comparant leurs valeurs de préférence par paire sur un ensemble de critères prédéterminés. Son objectif est de déterminer la meilleure

alternative en fonction du classement des alternatives utilisant cette fonction de préférence. Ses principales caractéristiques qui le rendent applicable sont sa simplicité, sa clarté et son équilibre. Cette technique peut être utilisée pour une classification partielle et complète de toutes les alternatives.

II.9.7.2. Étapes pour appliquer la technique PROMETHEE :

Cette technique est généralement appliquée dans les étapes suivantes :

- **Étape 01** : Déterminer l'écart sur la base de comparaisons par paires.
- **Étape 02** : Appliquer la fonction de préférence pour déterminer la préférence de chaque alternative par rapport aux autres.
- **Étape 03** : Calculer l'indice de préférence global ou global.
- **Étape 04** : Calculer la valeur des flux de surclassement pour chaque alternative.
- **Étape 05** : Déterminez le flux de surclassement net pour obtenir le classement complet.

II.9.8. WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) :

II.9.8.1. Contexte général :

Les méthodes de prise de décision à critères multiples (MCDM) peuvent être utilisées efficacement pour classer les décisions alternatives complexes et parvenir à des solutions optimales basées sur plusieurs critères, souvent contradictoires. Parmi la diversité de méthodes disponibles, l'évaluation globale pondérée du produit (WASPAS) est privilégiée en raison de sa capacité à accroître la précision du classement.[21]

WASPAS permet d'atteindre le plus haut niveau de précision d'estimation en appliquant la méthodologie suggérée pour optimiser la fonction agrégée pondérée. Elle combine deux méthodes bien établies : le modèle de somme pondérée (WSM) et la méthode du produit pondéré (WPM) pour créer une méthode qui surpasse la précision des deux méthodes originales. Ceci est réalisé grâce à l'optimisation du processus d'agrégation.

Il a été démontré que la précision d'une méthode agrégée sera toujours supérieure à celle des méthodes simples. L'impact du paramètre λ sur les performances de classement de la méthode WASPAS a également été étudié, révélant que de meilleures performances sont obtenues avec des valeurs de λ plus élevées. Lorsque la valeur de λ est fixée à 0, la méthode WASPAS se comporte comme la méthode WPM, tandis que lorsque λ vaut 1, elle se transforme en la méthode WSM.

Le principal avantage de la méthode WASPAS réside dans sa forte résistance au renversement de rang des alternatives envisagées. De plus, elle est capable de traiter à la fois des problèmes d'optimisation à réponses multiples dans divers processus de prise de décision. Cette méthode, caractérisée par sa simplicité mathématique et son exhaustivité, peut être appliquée avec succès à toute situation liée à la prise de décision.

Grâce à sa simplicité d'application et à ses résultats précis par rapport aux méthodes WSM et WPM, la méthode WASPAS est largement acceptée et utilisée comme une approche décisionnelle efficace. Elle vise à trouver une solution optimale en combinant l'agrégation pondérée des additifs et les méthodes multiplicatives. En résolvant les problèmes MCDM, elle augmente la précision du classement et est capable d'atteindre la plus haute précision d'estimation.

II.9.8.2. Étapes pour appliquer la technique WASPAS :

WASPAS représente l'une des méthodes les plus récentes en Analyse Multicritère d'Aide à la Décision (MCDM). Cette méthode fusionne deux approches bien établies dans le domaine, à savoir le modèle de somme pondérée (WSM) et le modèle de produit pondéré (WPM).

La procédure de solution commence par l'utilisation de la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{t1} & x_{t2} & \dots & x_{tn} \end{bmatrix} \tag{II.8}$$

Où t représente le nombre d'alternatives et n représente le nombre de critères d'évaluation. Pour $k = 1, \dots, t$ et $j = 1, \dots, n$, L'indice de performance de la k-ième alternative sur le j-ième critère est représenté par X_{kj} Pour normaliser cette matrice de décision, les équations suivantes sont utilisées :

- Pour les critères bénéfiques :

$$\tilde{x}_{kj} = \frac{x_{kj}}{\max_k x_{kj}} \tag{II.9}$$

- Pour les critères non bénéfiques :

$$\tilde{x}_{kj} = \frac{\min x_{kj}}{x_{kj}}$$

II.10

L'algorithme WASPAS, qui est considéré comme un algorithme idéal, s'appuie sur deux critères d'amélioration distincts, puisque le premier critère est le poids moyen de réussite similaire à la méthode WSM, tandis que le deuxième critère est basé sur la méthode WPM. En utilisant les principes de WSM et WPM, l'importance relative globale de l'alternative k est calculée en appliquant et en calculant les techniques WSM et WPM.

Formule pour la technologie WPM :

$$Q_k^{(2)} = \prod_{j=1}^n (\tilde{x}_{kj})^{w_j}$$

II.11

Formule pour la technologie WSM :

$$Q_k^{(1)} = \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{kj} w_j$$

II.12

La méthode d'évaluation des produits à somme agrégée et pondérée (WASPAS) pour le classement des alternatives est défini comme :

$$Q_k = \lambda Q_k^{(1)} + (1 - \lambda) Q_k^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{kj} w_j + (1 - \lambda) \prod_{j=1}^n (\tilde{x}_{kj})^{w_j}$$

II.13

Où :

$$\lambda = 0,0.1,0.2, \dots,1.$$

Les alternatives candidates peuvent être hiérarchisées en fonction des valeurs de Q , où la préférence est accordée à celle ayant la valeur la plus élevée. Lorsque λ est égal à 0, la méthode WASPAS se réduit à WPM, tandis que pour λ égal à 1, WASPAS équivaut à WSM.

II.9.8.3. Avantages de WASPAS :

Les avantages de cette technique sont les suivants :

- Compétent dans les situations unidimensionnelles.
- Aptitude à équilibrer les critères ; instinctif pour les décideurs.

La technique WASPAS offre des avantages significatifs en améliorant la précision du classement dans les problèmes MCDM, tout en intégrant une protection contre le renversement de classement des alternatives envisagées. De plus, elle permet de traiter efficacement à la fois les problèmes d'optimisation à réponse unique et à réponses multiples.

II.9.8.4. Limites de WASPAS :

Les limites de la technique WASPAS sont les suivantes :

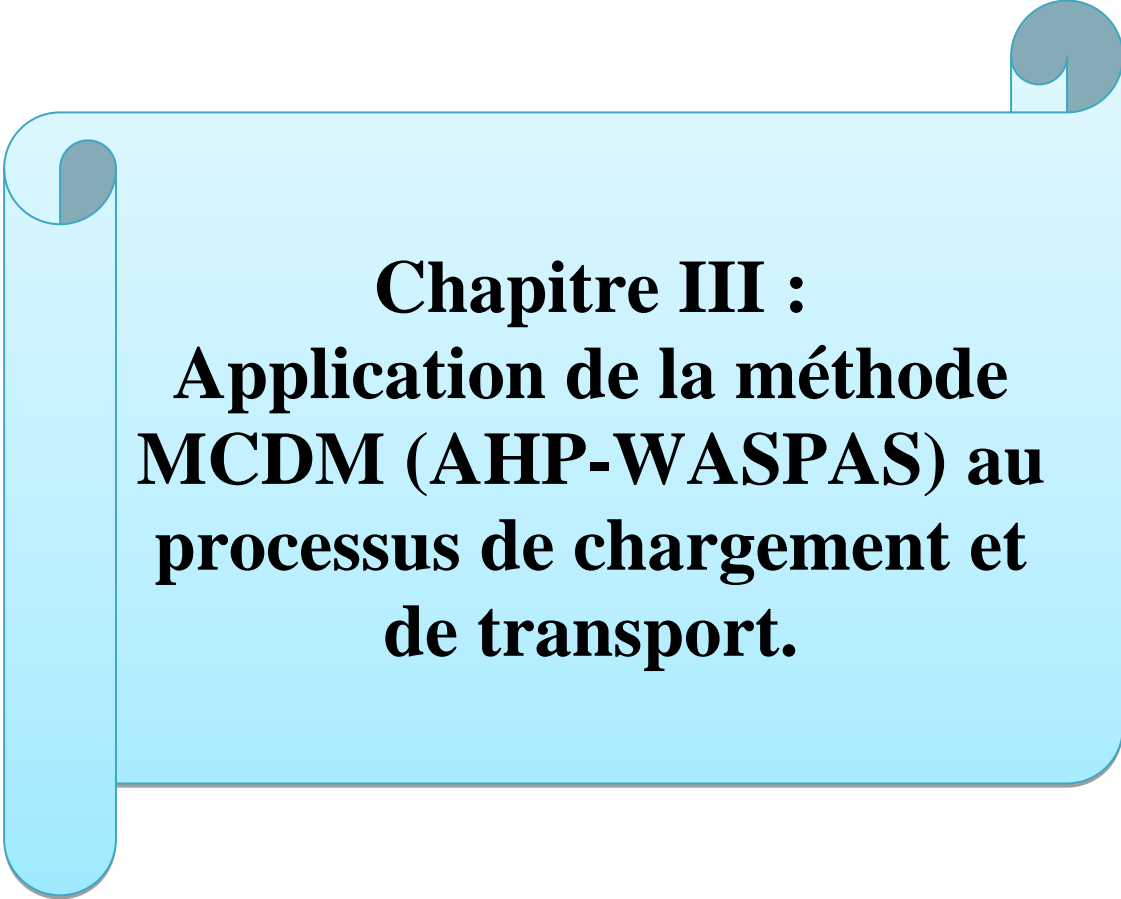
- Les estimations révélées ne correspondent pas toujours à la situation réelle, ce qui peut entraîner des résultats illogiques.
- Pas de solution avec un poids égal des décideurs

II.10. Conclusion :

En conclusion, Il existe également de nombreuses autres technologies MCDM qui n'ont pas été mentionnées, telles que : "LINMAP, DEMATEL, ARM/ARAS, SWARA, fuzzy DEMATEL , Fuzzy logic, Fuzzy AHP...etc". de sorte que ce chapitre s'est concentré sur les technologies connues les plus importantes et les plus connues, et cela ne signifie pas que la valeur Le reste des technologies est sous-estimé, qui n'ont pas été évoquées précédemment.

L'étude met en évidence les techniques de prise de décision multicritères (MCDM), avec un accent particulier sur les techniques de processus de hiérarchie analytique (AHP) et d'évaluation de la somme pondérée des produits (WASPAS). Ces approches fournissent des cadres précieux pour des scénarios de décision complexes, prenant en compte plusieurs critères et synthétisant diverses perspectives.

Leur polyvalence et leur puissance en font des outils indispensables pour aborder les complexités de la prise de décision dans divers domaines. Les chapitres suivants approfondiront la mise en œuvre pratique, les études de cas et les perspectives d'avenir, enrichissant ainsi notre compréhension de son importance dans le monde réel.



Chapitre III :
Application de la méthode
MCDM (AHP-WASPAS) au
processus de chargement et
de transport.



III.1. Introduction :

Le processus de chargement et de transport dans les mines est une opération complexe qui implique la gestion efficace de divers risques internes et externes afin de minimiser les pertes potentielles. Dans cette perspective, l'application de méthodes de prise de décision multicritère (MCDM) offre une approche systématique et robuste pour évaluer et optimiser les différentes alternatives disponibles.

Ce chapitre se concentre sur l'application de deux techniques MCDM spécifiques, à savoir l'Analytic Hierarchy Process (AHP) et la Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS), dans le contexte du chargement et du transport miniers. L'objectif principal est de démontrer comment ces méthodes peuvent être utilisées pour prendre des décisions éclairées, en tenant compte des multiples critères et des préférences des décideurs, afin de réduire les risques et les pertes tant internes qu'externes dans les opérations minières. En explorant les avantages et les limites de chaque technique.

Ce chapitre vise à fournir des insights précieux pour l'amélioration des processus de chargement et de transport dans l'industrie minière dans la mine de "Boukhadra, Tébessa", contribuant ainsi à l'efficacité opérationnelle et à la rentabilité globale des exploitations minières.

III.2. Présentation de la mine :

III.2.1. Situation géographique :

Le Djebel de Boukhadra est situé dans l'Atlas saharien, dans la partie orientale de l'Algérie. L'unité de Boukhadra se trouve à une altitude de 850 mètres, avec le point culminant du Djebel atteignant 1463 mètres.

La ville de Boukhadra fait partie de la wilaya de Tébessa et se situe à 45 km au nord-est de cette dernière. Elle est également située à environ 200 km au sud de la ville côtière d'Annaba et à seulement 18 km de la frontière tunisienne. Boukhadra est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer vers le complexe d'El-Hadjar.

Le climat de la région est continental et sec, avec des températures variant entre 40°C en été et 0°C en hiver. La pluviométrie est généralement faible, bien que des chutes de neige puissent parfois survenir.



III.2.2. Historique de la mine :

L'exploitation de la mine de Boukhadra a débuté à l'époque romaine pour extraire du cuivre dans la région du Beik. Par la suite, l'exploitation s'est étendue au zinc et à d'autres minéraux à usages multiples dans le cadre de la concession de Boukhadra, dirigée par un homme appelé Tadro. Entre 1903 et 1906, la concession Maqta Al-Hadid a réalisé la première investigation au moyen de la galerie située entre les niveaux 845 et 1225. De 1926 à 1966, date de la nationalisation des mines, la Société Alonza fut chargée de l'exploitation de la réserve de Boukhadra.

Pendant cette période, des recherches systématiques ont été menées sur le gisement de Boukhadra par le biais de travaux miniers et de sondages. De 1967 à 1984, la SONAREM était responsable de l'exploitation et des recherches sur les gisements ferrifères de l'Ouenza et de Boukhadra. Après la restructuration des entreprises en 1983-1984, la gestion, l'exploitation et le développement de ces recherches sur l'ensemble des gisements ferrifères du pays ont été confiés à la FEPHOS.

Depuis le 18 octobre 2001, dans le cadre d'un partenariat avec la holding étrangère L.N.M.N.V., un accord de partenariat a été signé avec HADID OUENZA-BOUKHADRA, filiale de FERPHOS, détenant une participation de 70%. Le 8 août 2016 : MINES DE FER DE L'EST « MFE ».

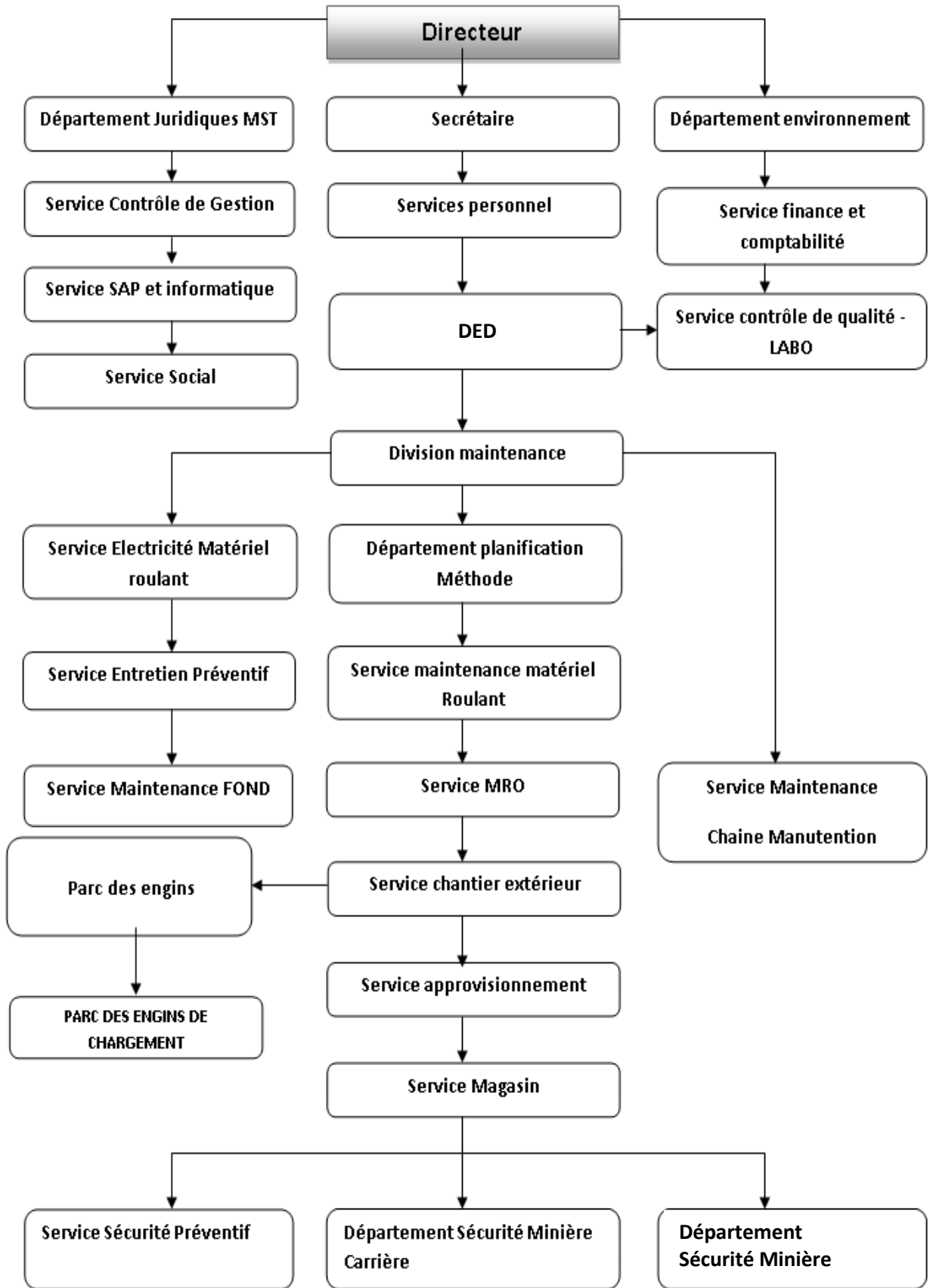


Figure III.3: l'organigramme de l'entreprise

III.2.3. La minéralisation et morphologie du gisement :

Le gisement de minerai de fer de Boukhadra se caractérise par une forme lenticulaire de type hydrothermal sédimentaire, avec une longueur variant entre 900 et 2200 mètres et une épaisseur allant de 10 à 50 mètres. La minéralisation est principalement du type fer hématite, avec une formule chimique de (Fe_2O_3) , et sa teneur moyenne dépasse les 50%.

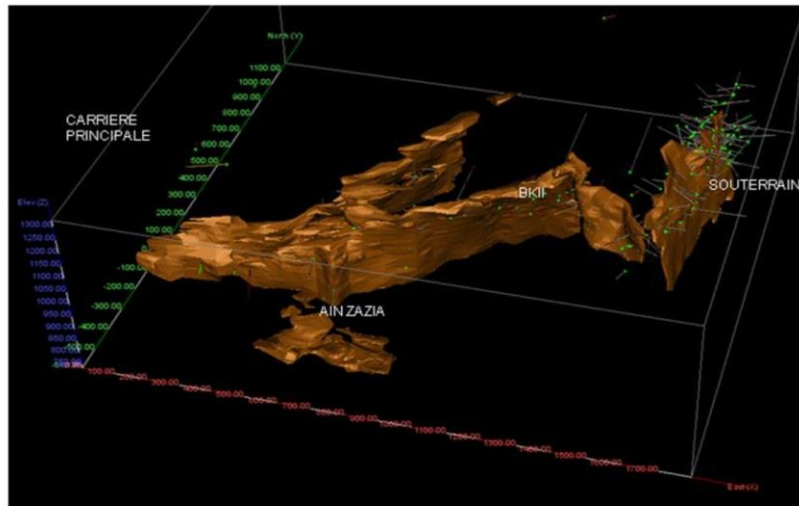


Figure III.4 : Le gisement de boukhadra en 3D

En outre, le gisement de Boukhadra est constitué de quatre (04) principaux corps minéralisés, ainsi que de petites veines de moindre importance.

- Corps principal.
- Corps Nord.
- Corps Médian.
- Corps Sud.

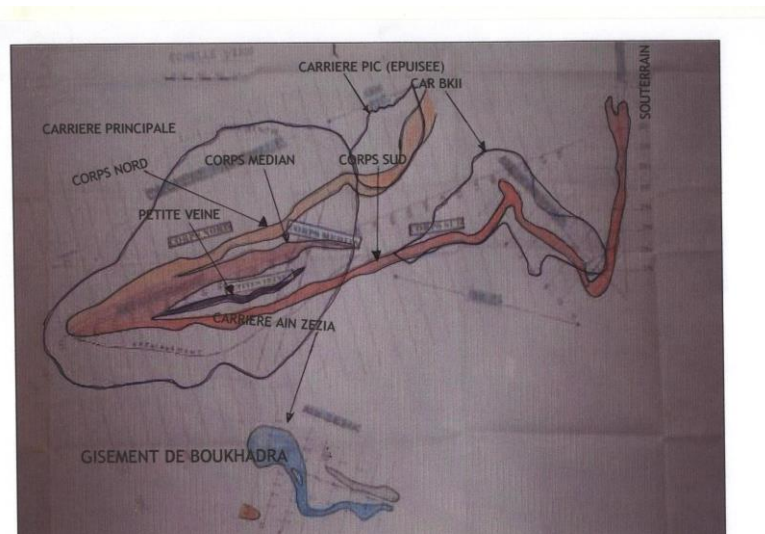


Figure III.5 : Carte géologique représente les différents corps du gisement

**Tableau III.1 : Représente les réserves géologiques et exploitables (31/12/2018)**

Sites et quartiers	Reserves géologie (T)		Reserves exp (T)		Observatio NS
	Tonnage	Fe %	Tonnage	Fe %	
Total cielouvert	13 173 601	53,51	11 995 985	52,35	
Total souterrain	33361499	55,76	30 860 599	55,34	
Total mine	46535100	55,11	42 856 584	54,48	CATEGORIES B+C1+C2
Total mine	56 255 698		52 577 182		CATEGORIES B+C1+C2+p

III.2.4. Mode d'exploitation :

Deux modes d'exploitations sont utilisés :

A)-ciel ouvert.

B)- souterrain.

III.2.5. Le régime de travail :**Tableau III.2 : représente le régime de travail à ciel ouvert de
boukhadra**

	Ciel ouvert	Unité
Nombre de jour ouvrable par ans.	255	Jour
Nombre de jour ouvrable par semaine.	5	Jour
Nombre de post par jour.	2	Poste
Duré d'un poste.	8	Heure

III.3. Calcul des paramètres nécessaires des équipements miniers de chargement et transport :

Durant ma formation, j'ai observé tous les processus liés au cycle de production des minéraux utiles et des stériles. Le chargement et le transport sont effectués à l'aide d'un chargeur CATERPILLAR 990K, d'une pelle hydraulique LIEBHERR R9100 et de sept camions CATERPILLAR 775G. Pour améliorer les paramètres de chargement et de transport dans la mine de Boukhadra-Tébessa, dans notre étude nous avons combiné la méthode



MCDM (AHP-WASPAS) dans le but de sélectionner le meilleur parmi les cinq scénarios proposés. Cela passe par la réduction des pertes de temps résultant du mode de gestion et d'allocation des équipements de chargement et de transport, ce qui conduit à réduire les pertes internes et externes.[33]

Pour créer les scénarios, nous avons réparti les machines de chargement dans trois chantiers différents, afin que chaque chantier travaille au chargement et au transport du minerai et du stérile, afin que le minerai soit transporté dans les deux chantiers jusqu'au concasseur et à stock minerai, tandis que le stérile est transporté vers le remblai. Nous avons ensuite effectué plusieurs distributions d'engins de transport vers les trois chantiers afin d'obtenir différents scénarios.[34]

Nous avons trois chantiers, dont deux au même niveau (1000 m), qui sont le premier et le troisième chantier. Quant au deuxième chantier, il est au niveau (1015 m), la distance de transport varie entre les trois chantiers :

- **Chantier 01** : Le processus de transport des roches stériles jusqu'à Remblai à une distance de 2 km.
- **Chantier 02** : Le processus de transport des roches stériles jusqu'à Remblai à une distance de 2.15 km.
- **Chantier 03** : Le processus de transport du minerai jusqu'au concasseur à une distance de 3 km.
- On calcule les trois paramètres (temps d'attente de machines de chargement, des camions et la productivité) Pour chaque scénario, Vous devez savoir ce qui suit :

$T_{att.ch}$: Temps d'attente de machines de chargement, (min)

$T_{att.c}$: Temps d'attente de camion, (min)

R : Rendement de chantier, (t/p)

T_{ch} : Temps de chargement total, (min)

N_c : Nombre de camions sur chaque chantier

t_{ch} : Temps de chargement du camion, Il a été calculé par chronomètre, (min)

T_{par} : Temps du parcours par le camion, Il a été calculé par chronomètre, (min)

$N_{cycle/p}$: Nombre de cycle par post, (cycle/p)

C_b : Capacité du benne, 64 t/p.

t_p : Durée d'un poste de travail, 8 heures.

III.3.1. Scénario 01 :

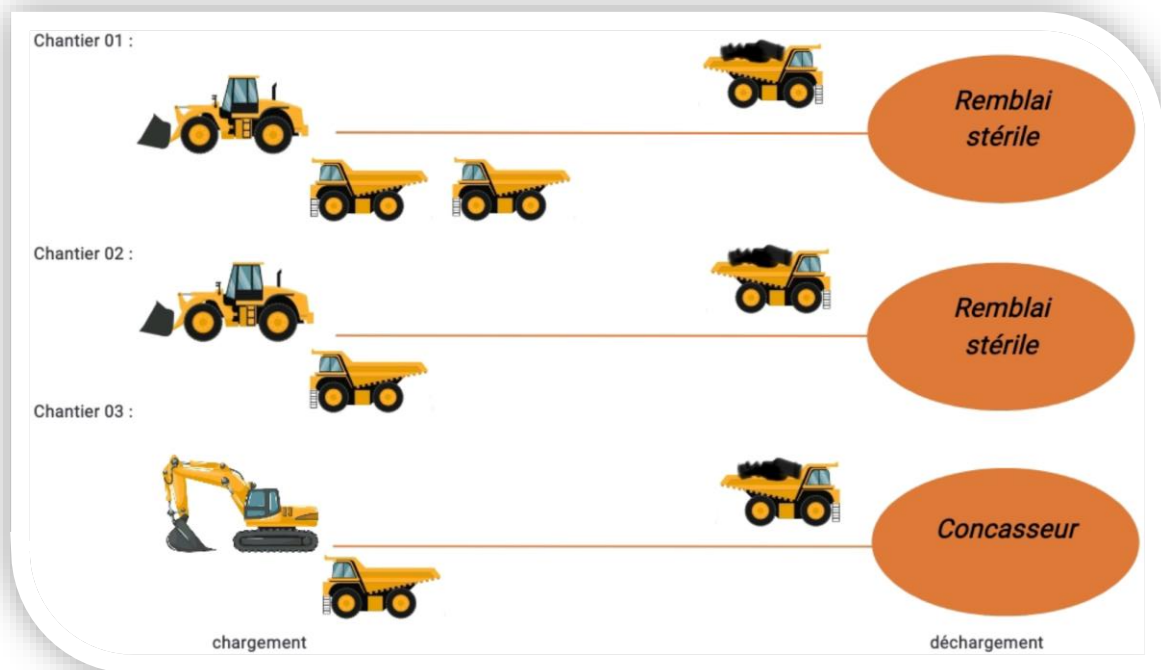


Figure III.6 : Schéma de distribution des machines dans le premier scénario

Chantier 01 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et trois camions CAT 775 G.

Calculer le temps d'attente du camion :

$$T_{att.c} = N_{cycle} \times N_c \times (T_{par} - T_{ch}) ; min/p \tag{III.1}$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min \tag{III.2}$$

$$T_{ch} = 3 \times 4 = 12 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ; \tag{III.3}$$

$$N_{cycle} = \frac{60 \times 8}{14} = 34 cycle/p$$



$$T_{att.c} = 34 \times 3 \times (14 - 12)$$

$$T_{att.c} = 204 \text{ min/p}$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b; t/p \quad \text{III.4}$$

$$R = 6528 \text{ t/p}$$

Chantier 02 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et deux camions CAT 775 G.

Calculer le temps d'attente des machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}); \text{min/p} \quad \text{III.5}$$

Temps dechargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch}; \text{min}$$

$$T_{ch} = 2 \times 4$$

$$T_{ch} = 8 \text{ min}$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}};$$

$$N_{cycle} = \frac{60 \times 8}{15} = 32 \text{ cycle/p}$$

$$T_{att.ch} = 32 \times (15 - 8)$$

$$T_{att.ch} = 224 \text{ min/p}$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b; t/p$$

$$R = 4096 \text{ t/p}$$

Chantier 03 : Une seule pelle Liebherr R9100 et deux camions CAT 775 G.

Calculer le temps d'attente du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}); \text{min/p}$$

**Temps de chargement total :**

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min$$

$$T_{ch} = 2 \times 6 = 12 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ;$$

$$N_{cycle} = \frac{60 \times 8}{22} = 21 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 21 \times (22 - 12)$$

$$T_{att.ch} = 210 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b ; t/p$$

$$R = 2688 t/p$$

Après avoir calculé les paramètres de chaque chantier, ces paramètres sont combinés pour obtenir les critères du scénario :

Temps d'attente totale du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = T_{att.ch1} + T_{att.ch2} + T_{att.ch3} \tag{III.6}$$

$$T_{att.ch} = 0 + 224 + 210 = 434 min/p$$

Temps d'attente totale du camion :

$$T_{att.c} = T_{att.c1} + T_{att.c2} + T_{att.c3}$$

$$T_{att.c} = 204 + 0 + 0 = 204 min/p$$

Rendement total des chantiers :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \tag{III.7}$$

$$R = 6528 + 4096 + 2688 = 13312 t/p$$

III.3.2. Scénario 02 :

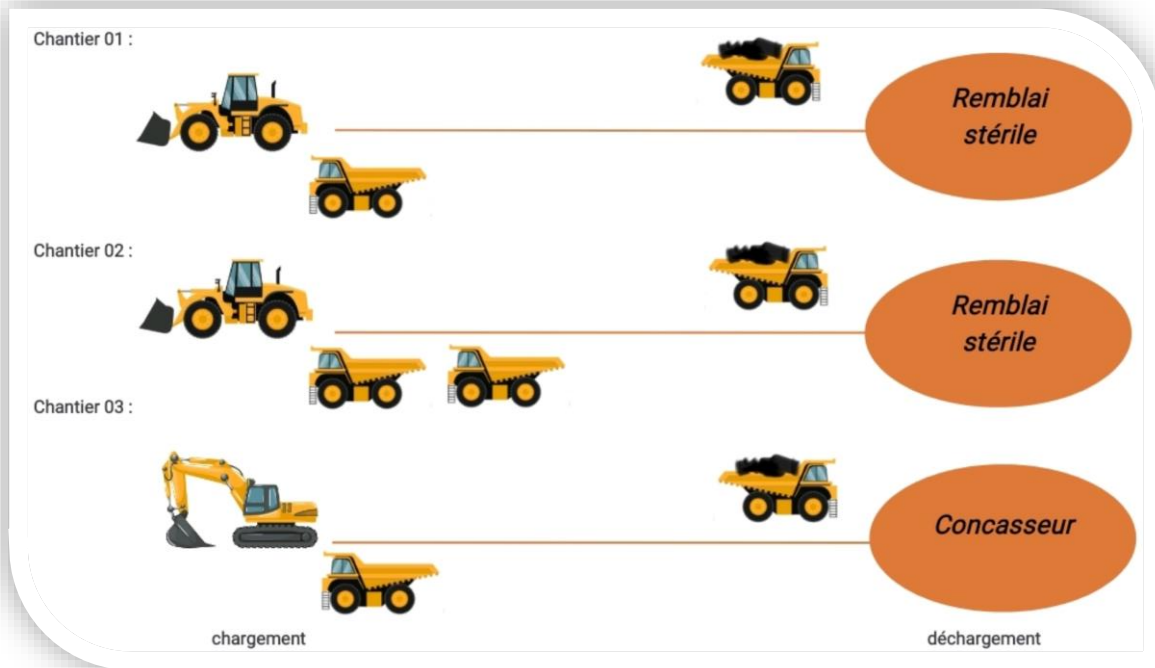


Figure III.7 : Schéma de distribution des machines dans le deuxième scénario

Chantier 01 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et deux camions CAT 775 G.

Calculer le temps d'attente du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}) ; min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min$$

$$T_{ch} = 8 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ;$$

$$N_{cycle} = 34 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 204 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b ; t/p$$

$$R = 4352 t/p$$



Chantier 02 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et trois camions CAT 775 G.

Calculer le temps d'attente du camion :

$$T_{att.c} = N_{cycle} \times N_c \times (T_{par} - T_{ch}) ; min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min$$

$$T_{ch} = 12 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ;$$

$$N_{cycle} = 32 cycle/p$$

$$T_{att.c} = 288 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b ; t/p$$

$$R = 6144 t/p$$

Chantier 03 : Une seule pelle Liebherr R9100 et deux camions CAT 775 G.

Nous avons calculé les paramètres de ce scénario du chantier à l'avance, et ils sont les mêmes que les résultats de chantier 3 dans le premier scénario.

Après avoir calculé les paramètres de chaque chantier, ces paramètres sont combinés pour obtenir les critères du scénario :

Temps d'attente totale des machines de chargement :

$$T_{att.ch} = T_{att.ch1} + T_{att.ch2} + T_{att.ch3}$$

$$T_{att.ch} = 204 + 0 + 210 = 414 min/p$$

Temps d'attente totale du camion :

$$T_{att.c} = T_{att.c1} + T_{att.c2} + T_{att.c3}$$

$$T_{att.c} = 0 + 288 + 0 = 288 min/p$$

Rendement total des chantiers :

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = 4352 + 6144 + 2688 = 13184 t/p$$

III.3.3. Scénario 03 :

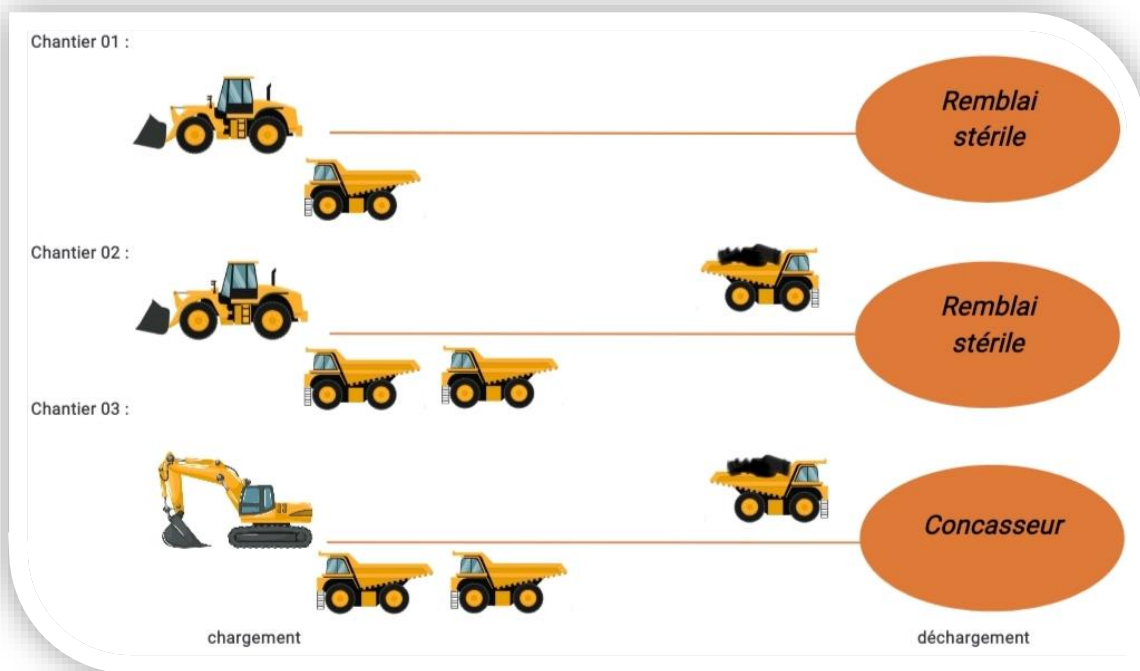


Figure III.8 : Schéma de distribution des machines dans le troisième scénario

Chantier 01 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et un camion CAT 775G.

Calculer le temps d'attente du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}) ; min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min$$

$$T_{ch} = 4 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ;$$

$$N_{cycle} = 34 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 340 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b ; t/p$$

$$R = 2176 t/p$$

Chantier 02 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et trois camions CAT 775G.

Nous avons pré-calculé les paramètres de ce scénario de chantier, qui sont les mêmes que les résultats du chantier 2 du deuxième scénario.

Chantier 03 : Une seule pelle Liebherr R9100 et trois camions CAT 775G.

Calculer le temps d'attente du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}); min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch}; min$$

$$T_{ch} = 18 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}};$$

$$N_{cycle} = 21 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 84 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b; t/p$$

$$R = 4032 t/p$$

Après avoir calculé les paramètres de chaque chantier, ces paramètres sont combinés pour obtenir les critères du scénario :

Temps d'attente totale des machines de chargement :

$$T_{att.ch} = T_{att.ch1} + T_{att.ch2} + T_{att.ch3}$$

$$T_{att.ch} = 340 + 0 + 84 = 424 min/p$$

Temps d'attente totale du camion :

$$T_{att.c} = T_{att.c1} + T_{att.c2} + T_{att.c3}$$

$$T_{att.c} = 0 + 288 + 0 = 288 min/p$$

Rendement total des chantiers :

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = 2176 + 6144 + 4032 = 12352 t/p$$

III.3.4. Scénario 04 :

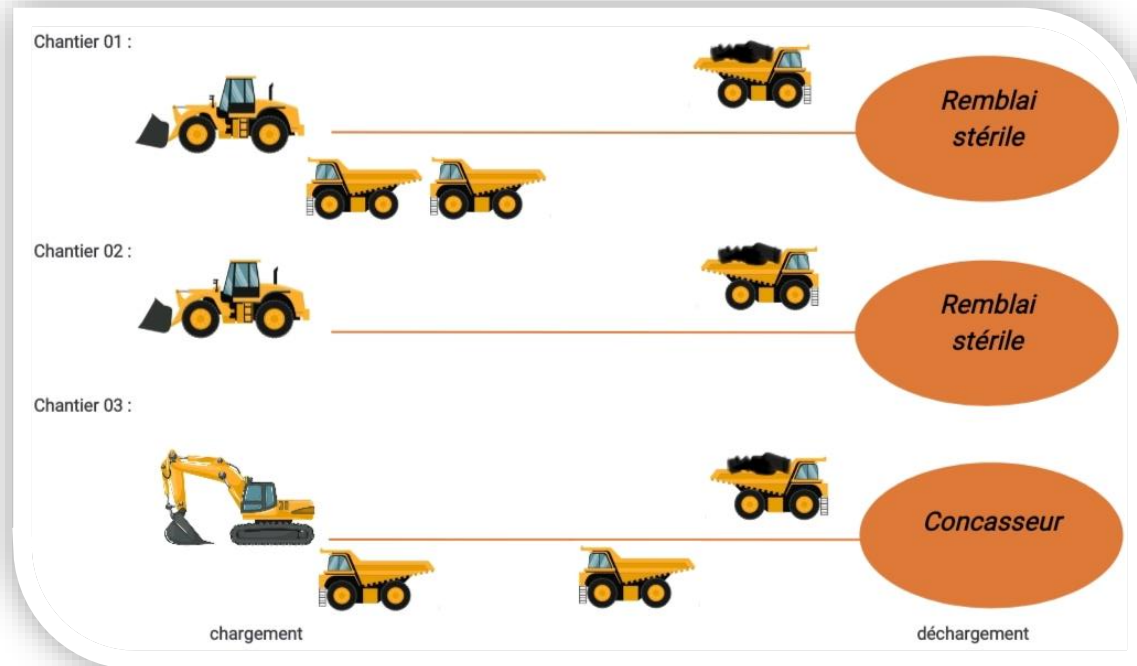


Figure III.9 : Schéma de distribution des machines dans le quatrième scénario

Chantier 01 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et trois camions CAT 775 G.

Nous avons pré-calculé les paramètres de ce scénario de chantier, qui sont les mêmes que les résultats du chantier 1 du premier scénario.

Chantier 02 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et un camion CAT 775G.

Calculer le temps d'attente des machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}) ; min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min$$

$$T_{ch} = 4 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ;$$

$$N_{cycle} = 32 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 352 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b ; t/p$$

$$R = 2048 t/p$$



Chantier 03 : Une seule pelle Liebherr R9100 et trois camions CAT 775G.

Nous avons pré-calculé les paramètres de ce scénario de chantier, qui sont les mêmes que les résultats du chantier 3 du troisième scénario.

Après avoir calculé les paramètres de chaque chantier, ces paramètres sont combinés pour obtenir les critères du scénario :

Temps d'attente totale des machines de chargement :

$$T_{att.ch} = T_{att.ch1} + T_{att.ch2} + T_{att.ch3}$$
$$T_{att.ch} = 0 + 352 + 84 = 436 \text{ min/p}$$

Temps d'attente totale du camion :

$$T_{att.c} = T_{att.c1} + T_{att.c2} + T_{att.c3}$$
$$T_{att.c} = 204 + 0 + 0 = 204 \text{ min/p}$$

Rendement total des chantiers :

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$
$$R = 6528 + 2048 + 4032 = 12608 \text{ t/p}$$

III.3.5. Scénario 05 :

Dans ce scénario, nous avons remplacé la machine de chargement du premier chantier par la machine de chargement du troisième chantier.

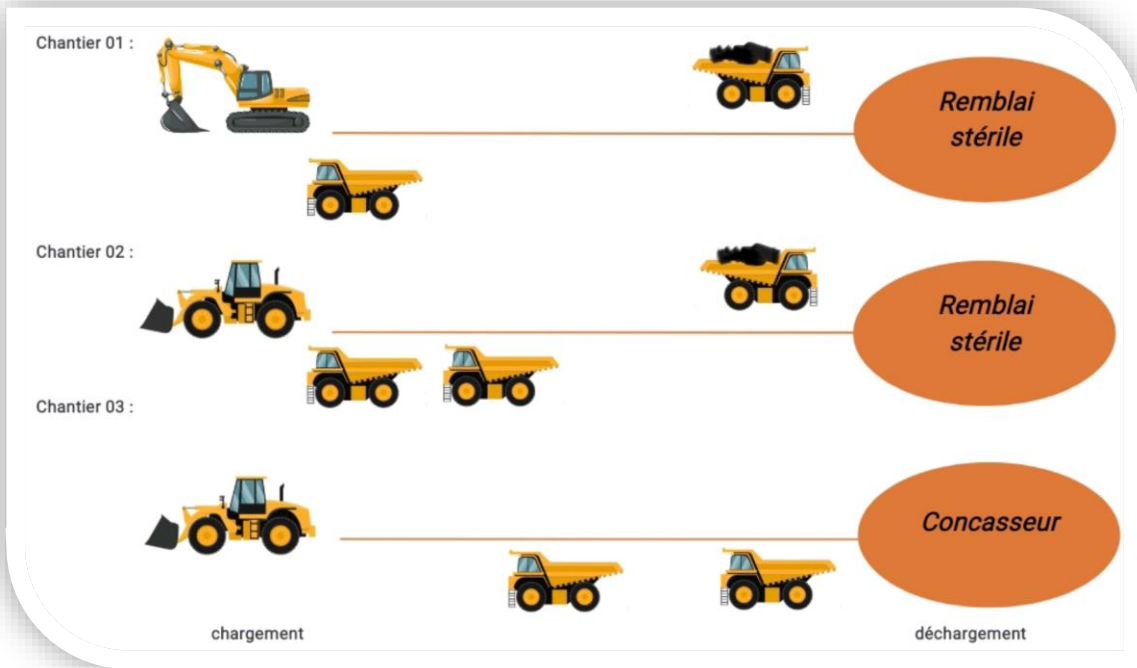


Figure III.10 : Schéma de distribution des machines dans le cinquième scénario

Chantier 01 : Une seule pelle Liebherr R9100 et deux camions CAT 775 G

Calculer le temps d'attente des machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}) ; min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch} ; min$$

$$T_{ch} = 12 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}} ;$$

$$N_{cycle} = 30 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 120 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b ; t/p$$

$$R = 3840 t/p$$

Chantier 02 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et trois camions CAT 775G.

Nous avons pré-calculé les paramètres de ce scénario de chantier, qui sont les mêmes que les résultats du chantier 2 du deuxième scénario.

Chantier 03 : Une seule chargeuse sur pneus CAT 990 K et deux camions CAT 775 G.

Calculer le temps d'attente du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = N_{cycle} \times (T_{par} - T_{ch}); min/p$$

Temps de chargement total :

$$T_{ch} = N_c \times t_{ch}; min$$

$$T_{ch} = 8 min$$

Nombre de cycle par post :

$$N_{cycle} = \frac{60 \times t_p}{T_{par}};$$

$$N_{cycle} = 24 cycle/p$$

$$T_{att.ch} = 288 min/p$$

Rendement de chantier :

$$R = N_{cycle} \times N_c \times C_b; t/p$$

$$R = 3072 t/p$$

Après avoir calculé les paramètres de chaque chantier, ces paramètres sont combinés pour obtenir les critères du scénario :

Temps d'attente totale du machines de chargement :

$$T_{att.ch} = T_{att.ch1} + T_{att.ch2} + T_{att.ch3}$$

$$T_{att.ch} = 120 + 0 + 288 = 408 min/p$$

Temps d'attente totale du camion :

$$T_{att.c} = T_{att.c1} + T_{att.c2} + T_{att.c3}$$

$$T_{att.c} = 0 + 288 + 0 = 288 min/p$$

Rendement total des chantiers :

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = 3840 + 6144 + 3072 = 13056 t/p$$



III.4. Application de la méthode MCDM :

Certains critères liés au processus de chargement et de transport dans les mines ont été identifiés, et sur la base de ces critères, le meilleur scénario sera choisi parmi les cinq scénarios précédents, en appliquant deux techniques : AHP pour calculer les poids et WASPAS pour prendre la décision.

III.4.1. Matrice MCDM :

Tableau III.3 : Matrice des critères

Critères	<i>T_{att.c}</i>	<i>T_{att.ch}</i>	Rendement	Qualité
Scénario 01	204	434	13312	2
Scénario 02	288	414	13184	5
Scénario 03	288	424	12352	4
Scénario 04	204	436	12608	1
Scénario 05	288	408	13056	3

III.4.2. Calcul du poids des critères (AHP) :

Pour calculer le poids de chaque critère, nous utilisons la technique de la hiérarchie (AHP).

A)- L'importance des critères :

Nous choisissons l'importance de chaque critère en donnant une valeur numérique comprise entre 1 et 9, de sorte que chaque chiffre symbolise un degré d'importance, de sorte que plus le chiffre est élevé, plus le critère est important. Ces nombres sont déterminés en fonction des exigences. de la personne qui prend la décision.

Tableau III.4 : L'importance des critères

Critères	L'importance
<i>T_{att.c}</i>	5
<i>T_{att.ch}</i>	6
Rendement	4
Qualité	1

B)- Matrice de comparaison : Dans cette matrice nous déterminons l'importance de chaque critère par rapport aux autres.



Tableau III.5 : Matrice de comparaison

	<i>T_{att.c}</i>	<i>T_{att.ch}</i>	Rendement	Qualité
<i>T_{att.c}</i>	1	0.5	4	5
<i>T_{att.ch}</i>	2	1	5	6
Rendement	0.25	0.2	1	4
Qualité	0.2	0.1667	0.25	1

C)-Matrice normalisée : Ensuite, il faut normaliser cette matrice à l'aide de la formule suivante :

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \text{III.8}$$

Tableau III.6 : Matrice normalisée

	<i>T_{att.c}</i>	<i>T_{att.ch}</i>	Rendement	Qualité
<i>T_{att.c}</i>	0.2899	0.2679	0.3902	0.3125
<i>T_{att.ch}</i>	0.5797	0.5357	0.4878	0.3750
Rendement	0.0725	0.1071	0.0976	0.2500
Qualité	0.0580	0.0893	0.0244	0.0625

Ensuite, pour obtenir le vecteur propre principal, on calcule la moyenne des lignes de la matrice normalisée. Cela nous donne le vecteur propre principal.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} \quad w_i = \frac{\sum_{j=1}^m b_{ij}}{m} \quad \text{III.9}$$

D)- Poids des critères :

Tableau III.7 : Poids des critères

Critères	W_i
<i>T_{att.c}</i>	0.3151
<i>T_{att.ch}</i>	0.4946
Rendement	0.1318
Qualité	0.0585

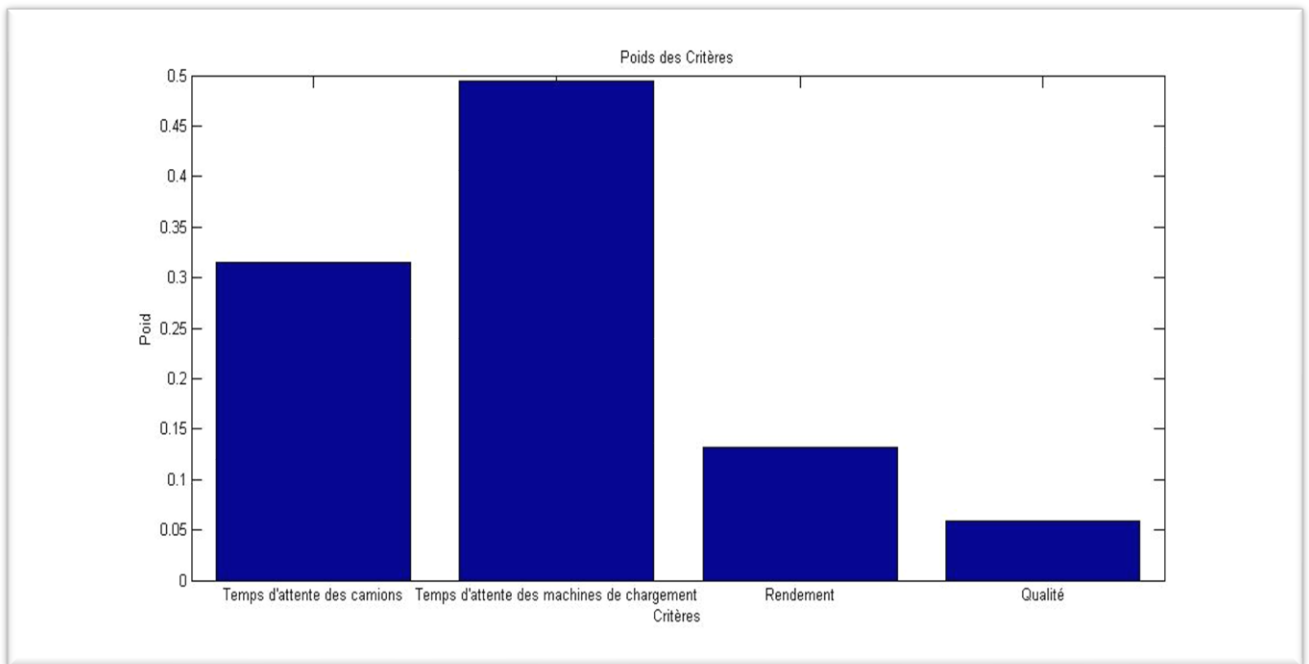


Figure III.11 : poids des critères

E)- Indice de cohérence : L'indice de cohérence s'exprime par la relation suivante :

$$IC = \frac{\lambda - m}{m - 1} ; m = 4 \quad \text{III.10}$$

Où :

λ : est la somme des produits des éléments de chaque ligne du vecteur propre principal par les éléments correspondants de la matrice de comparaison paire.

m : nombre de critères.

Lambda est calculé avec la relation suivante :

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{m} \quad \text{III.11}$$

$$\lambda = 4.2190$$

Donc :

$$IC = 0.0730$$

Enfin, à l'aide de ce tableau, on peut calculer le rapport de cohérence (RC) :



Tableau III.8 : Indice de cohérence aléatoire (IR)

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Nous avons alors 4 critères donc : IR = 0.9

CR est calculé avec la relation suivante :

$$CR = \frac{IC}{RI} \tag{III.12}$$

$$CR = 0.0811$$

Les données obtenues sont considérées comme cohérentes si le rapport de cohérence (CR) est inférieur à 10 % ou 0.1. Cependant, si le CR est supérieur ou égal à 10 % ou 0.1, les résultats ne sont pas concluants, ce qui indique que la matrice de comparaison doit être mise à jour.

III.4.3. Application de la technique WASPAS :

- Matrice normalisée :

Tableau III.9 : Matrice des critères

Priorité	Non bénéfique		Bénéfique	
Poids (%)	31.51	49.46	13.18	05.85
Critères	<i>T_{att.c}</i>	<i>T_{att.ch}</i>	Rendement	Qualité
Scénario 01	204	434	13312	2
Scénario 02	288	414	13184	5
Scénario 03	288	424	12352	4
Scénario 04	204	436	12608	1
Scénario 05	288	408	13056	3

Pour extraire la matrice imprimée, nous utilisons les relations suivantes :

- Pour les critères bénéfiques :

$$\tilde{x}_{kj} = \frac{x_{kj}}{\max_k x_{kj}} \tag{III.13}$$



- Pour les critères non bénéfiques :

$$\tilde{x}_{kj} = \frac{\min x_{kj}}{x_{kj}} \tag{III.14}$$

On obtient donc la matrice suivante :

Tableau III.10 : Matrice normalisée

Priorité	Non bénéfique		Bénéfique	
Poids (%)	31.51	49.46	13.18	05.85
Critères	<i>T_{att.c}</i>	<i>T_{att.ch}</i>	Rendement	Qualité
Scénario 01	1	0.9401	1	0.4
Scénario 02	0.7083	0.9855	0.9904	1
Scénario 03	0.7083	0.9623	0.9279	0.8
Scénario 04	1	0.9358	0.9471	0.2
Scénario 05	0.7083	1	0.9808	0.6

La méthode d'évaluation des produits à somme agrégée et pondérée (WASPAS) est calculée selon la formule suivante :

$$Q_k = \lambda Q_k^{(1)} + (1 - \lambda) Q_k^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{kj} w_j + (1 - \lambda) \prod_{j=1}^n (\tilde{x}_{kj})^{w_j} \tag{III.15}$$

Où :

$$\lambda = 0,0.1,0.2, \dots,1.$$

On prend la valeur de $\lambda = 0,5$

Nous commençons par calculer le score de performance pour chaque scénario à l'aide des techniques WSM et WPM en utilisant les deux formules suivantes :

- Formule pour la technique WSM :

$$Q_k^{(1)} = \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{kj} w_j \tag{III.16}$$



- Formule pour la technique WPM :

$$Q_k^{(2)} = \prod_{j=1}^n (\tilde{x}_{kj})^{w_j} \tag{III.17}$$

Et en appliquant la relation, on obtient le score de performance pour chaque scénario comme indiqué dans le tableau :

Tableau III.11 : Score de performance pour chaque scénario (WSM et WPM)

Priorité	Non bénéfique		Bénéfique		Score(WSM)	Score(WPM)
	Poids (%)					
	31.51	49.46	13.18	05.85		
Critères	<i>T_{att.c}</i>	<i>T_{att.ch}</i>	Rendement	Qualité		
Scénario 01	204	433	13312	2	0.9353	0.9193
Scénario 02	288	414	13184	5	0.8997	0.8894
Scénario 03	288	424	12352	4	0.8682	0.8602
Scénario 04	204	436	12608	1	0.9145	0.8745
Scénario 05	288	408	13056	3	0.8822	0.8684

Finalement, nous obtenons les résultats et le classement suivant pour chaque scénario :

Tableau III.12 : Score de performance pour chaque scénario et leur classement (WASPAS)

Scenarios	Score (WSM)	Score (WPM)	Score (WASPAS)	Rang
Scénario 01	0.9353	0.9193	0.9273	1
Scénario 02	0.8997	0.8894	0.8946	2
Scénario 03	0.8682	0.8602	0.8642	5
Scénario 04	0.9145	0.8745	0.8945	3
Scénario 05	0.8822	0.8684	0.8753	4



Selon la classification technologique WASPAS, le premier scénario a été classé comme le meilleur scénario.

En résumé, l'ajout de WASPAS à notre cadre décisionnel peut améliorer notre capacité à évaluer les scénarios de manière globale et à faire un choix plus éclairé que les scores WSM et WPM.

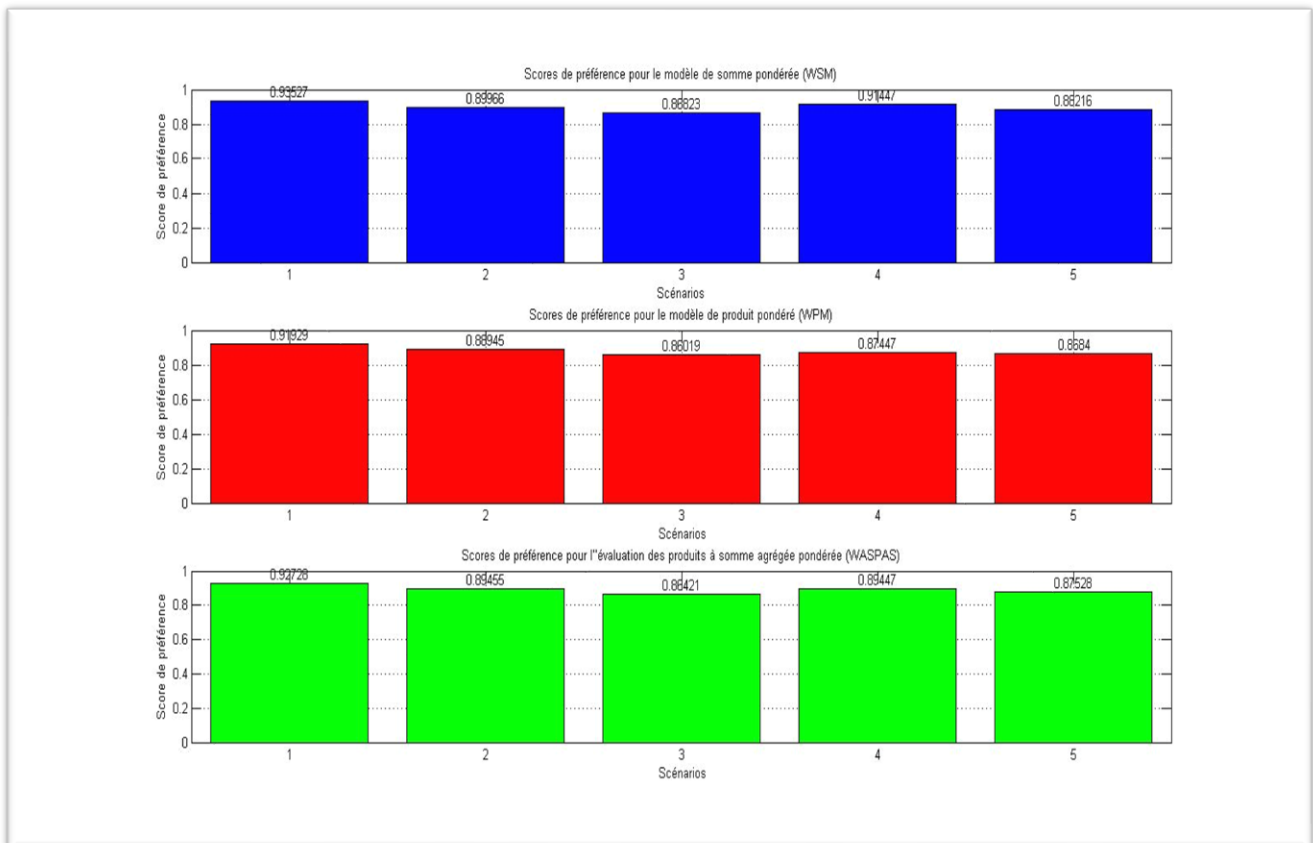


Figure III.12 : Les colonnes graphiques représentent le score de performance pour chaque scénario

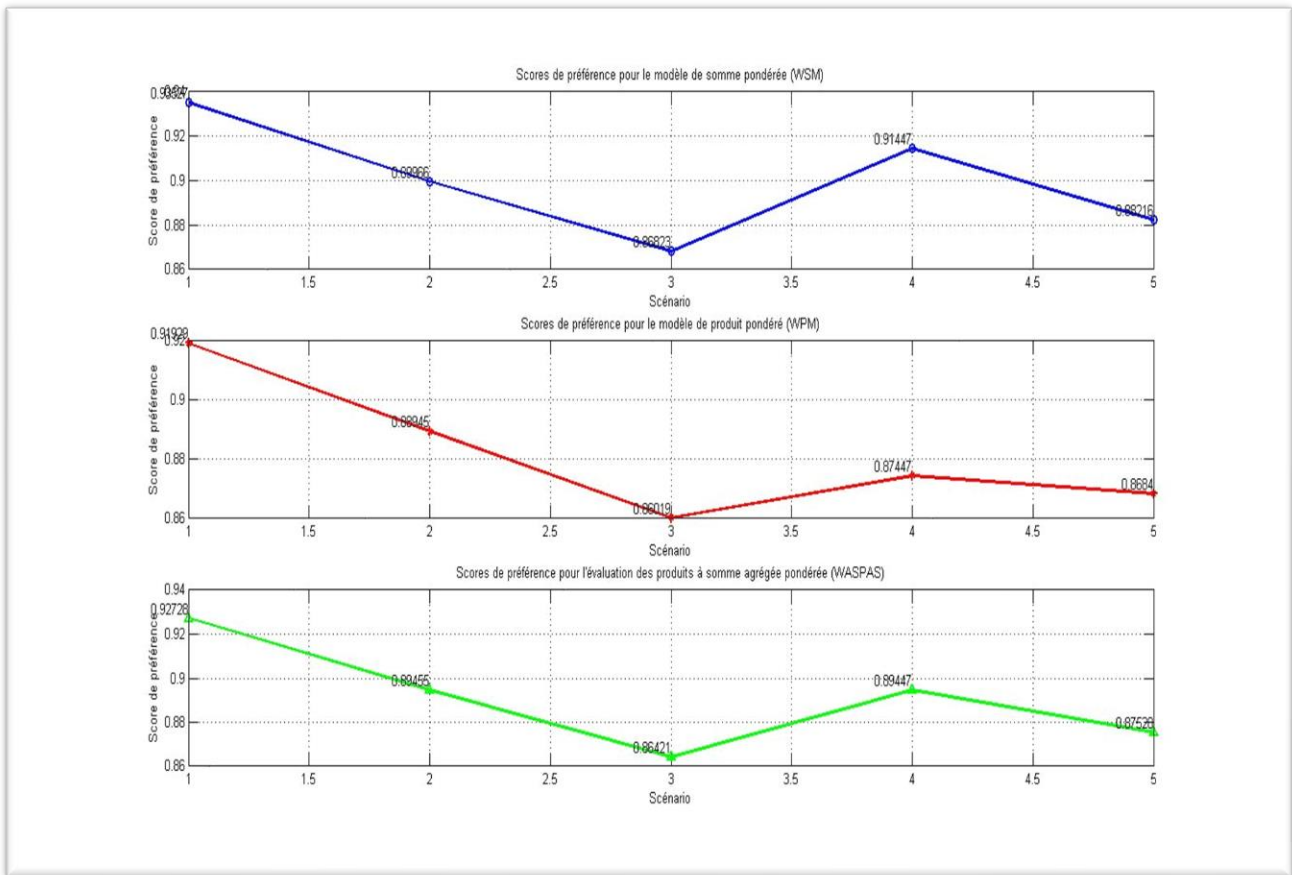


Figure III.13 : Courbes représentant les performances de chaque scénario pour chaque technique

III.5. Conclusion :

Nous concluons ce chapitre en disant que les technologies AHP et WASPAS ont facilité le processus de prise de décision pour celui qui prend la décision en l'aidant à lui montrer quelles décisions sont correctes, tout en évitant des pertes internes et externes pour la mine en général et engins de chargement et transport notamment.



Conclusion Générale



Conclusion générale

En conclusion, nous disons que le processus de chargement et de transport dans les mines est l'un des processus les plus importants du cycle d'exploitation minière. Par conséquent, une extrême prudence doit être prise dans la conduite de ces deux processus importants pour éviter les pertes internes et externes de la mine et pour assurer un bon processus de travail.

Pour assurer un bon flux de travail, il existe de nombreuses idées et techniques qui peuvent aider dans ce processus. Parmi ces techniques, nous avons utilisé les deux techniques de la méthode de prise de décision multicritère, à savoir (AHP et WASPAS). Nous avons abordé la définition de la méthode MCDM Et ses différentes techniques en général et la définition de ces deux techniques en particulier et leur utilisation. Dans le processus de chargement et de transport.

Après avoir appliqué ces deux technologies (AHP et WASPAS) dans le processus de chargement et de transport dans la mine de fer de Boukhadra, où le minerai et le stérile étaient transportés du point de chargement au point de déchargement.

nous avons pu identifier les meilleures décisions parmi cinq décisions différentes. ou des scénarios qui partagent quatre critères différents. Nous avons conclu que le meilleur scénario ou décision est le premier scénario, comme nous l'avons expliqué précédemment.

Les études, observations et résultats obtenus nous permettent de fournir Les recommandations suivantes :

- Afin d'augmenter la productivité et de réduire les pertes de temps, le nombre de machines sur les chantiers doit être augmenté.
- Des travaux doivent être effectués pour élargir la route de passage des camions pendant le processus de transport afin d'éviter les embouteillages, qui entraînent une perte de temps.
- Des travaux doivent être réalisés pour créer des chemins ou des routes plus courts, car la distance entre le site de chargement et le site de déchargement est jugée assez grande, et également pour réduire le temps d'attente pour le chargement des machines.

Enfin, n'oublions pas que chaque technologie a ses inconvénients et ses avantages. L'esprit humain continue de rechercher et de développer jour après jour pour éviter les problèmes et les pertes auxquels est confronté l'individu, que ce soit comme nous l'avons fait



dans le domaine du chargement et du transport ou même dans autre domaines divers. afin d'atteindre un effort continu et l'excellence.



Références bibliographies



Références bibliographiques:

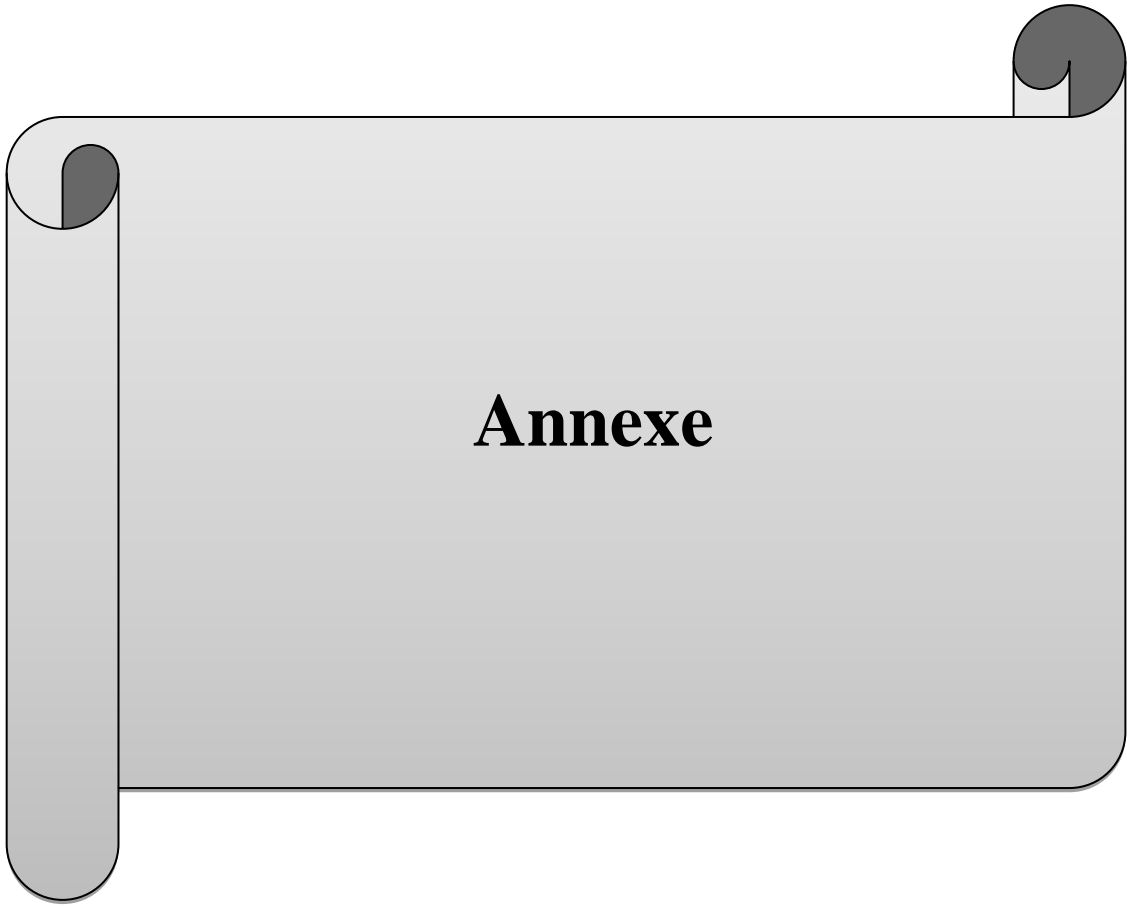
- [1] société de l'industrie Minière, *Mémento des mines et carrières*, N 4. 1998.
- [2] F. Poulard *et al.*, "Exploitation minière et traitement des minerais," *Collect. la mine Fr.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [3] D. M. Bajany, X. Xia, and L. Zhang, "A MILP Model for Truck-shovel Scheduling to Minimize Fuel Consumption," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2739–2745, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.925.
- [4] D. Komljenovic, "Maintenance / Engineering Optimisation des systèmes pelles – camions en utilisant la théorie des files d'attente," no. April, 2006.
- [5] Y. Choi, H. Nguyen, X. N. Bui, and T. Nguyen-Thoi, "Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods," *Resour. Policy*, vol. 75, no. December 2021, p. 102522, 2022, doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102522.
- [6] F. Sitorus, J. J. Cilliers, and P. R. Brito-Parada, "Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends," *Expert Syst. Appl.*, vol. 121, pp. 393–417, 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2018.12.001.
- [7] H. Taherdoost and M. Madanchian, "Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts," *Encyclopedia*, vol. 3, no. 1, pp. 77–87, 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3010006.
- [8] A. Singh, "Major MCDM Techniques and their application-A Review," *IOSR J. Eng.*, vol. 4, no. 5, pp. 15–25, 2014, doi: 10.9790/3021-04521525.
- [9] Y. Qin, Q. Qi, P. Shi, S. Lou, P. J. Scott, and X. Jiang, "Multi-Attribute Decision-Making Methods in Additive Manufacturing: The State of the Art," *Processes*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.3390/pr11020497.
- [10] A. Jahan and K. L. Edwards, "Multi-criteria Decision-Making for Materials Selection," *Multi-criteria Decis. Anal. Support. Sel. Eng. Mater. Prod. Des.*, pp. 31–41, 2013, doi: 10.1016/b978-0-08-099386-7.00003-9.
- [11] S. Malakar and A. K. Rai, "Estimating seismic vulnerability in West Bengal by AHP-WSM and," *Nat. Hazards Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 464–473, 2023, doi: 10.1016/j.nhres.2023.06.001.
- [12] S. M. Ul Islam, S. Khan, H. Ahmad, M. A. Ur Rahman, S. Tomar, and M. Z. Khan, "Assessment of challenges and problems in supply chain among retailers during COVID-19 epidemic through AHP-TOPSIS hybrid MCDM technique," *Internet*



- Things Cyber-Physical Syst.*, vol. 2, no. July, pp. 180–193, 2022, doi: 10.1016/j.iotcps.2022.10.001.
- [13] D. Pamucar, “An integrated Fine-Kinney risk assessment model utilizing Fermatean fuzzy AHP-WASPAS for occupational hazards in the aquaculture sector,” vol. 186, no. November 2023, pp. 232–251, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.04.025.
- [14] G. Chen, R. Chang, J. Bai, J. Li, and X. Li, “Shovel parameter sensitivity analysis and online optimization method for unmanned loaders,” *Autom. Constr.*, vol. 157, no. November 2023, p. 105149, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105149.
- [15] B. wei Cao, C. yi Liu, W. Chen, P. Tan, and J. wen Yang, “Shovel-loading cooperative control of loader under typical working conditions,” *ISA Trans.*, vol. 142, pp. 702–715, 2023, doi: 10.1016/j.isatra.2023.07.010.
- [16] Y. I. Yano, *COURS D ' INTRODUCTION L ' EXPLOITATION DES MINES Université de Kolwezi*, no. November 2019. ILUNGA YANO YANNICK Université de Kolwezi, 2020.
- [17] A. BELHAMRA, “Amélioration des Conditions d’exploitation des Convoyeurs à Bande,” p. 155, 2015.
- [18] <http://www.jstor.org/stable/24468287>. A. 11 M. 2024. Faddeev, B. V. “Historique de l’utilisation Des Convoyeurs à Bande Dans Les Travaux Miniers.” *Revue d’histoire Des Sciences*, vol. 24, no. 1, 1971, pp. 61–66. JSTOR, “No Title”.
- [19] “Caterpillar Performance Handbook”.
- [20] K. M. N. PIERR, “D’EXPLOITATION DES MINES À CIEL OUVERT,” UNIVERSITE DE LUBUMBASHI FACULTE POLYTECHNIQUE DEPARTEMENT DES MINES.
- [21] G. N. Yücenur and A. Ipekçi, “SWARA/WASPAS methods for a marine current energy plant location selection problem,” *Renew. Energy*, vol. 163, pp. 1287–1298, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.08.131.
- [22] S. Fomba, “Multi-Criteria Decision Making,” universite de Toulouse, 2022.
- [23] J. J. Thakkar, *Multi-Criteria Decision Making*, vol. 336. 2021. doi: 10.1007/978-981-33-4745-8_5.
- [24] K. Fenniche, “Application of the Analytic Hierarchy Process (Ahp) in the Evaluation of Commercial Banks Performance,” *Les Cah. du Cread*, vol. 34, no. 04, pp. 39–59, 2019.
- [25] J. Pous de la Flor, M. C. Castañeda, M. Arlandi, F. Ordás, and J. Pous Cabello, “AHP algorithm used to select suitable abandoned underground mines for energy storage



- infrastructure – iCAES technology. A specific case study for León (Spain),” *Heliyon*, vol. 9, no. 9, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20045.
- [26] V. Rajput, N. Kumar, and A. Agrawal, “Materials Today : Proceedings Integrated AHP-TOPSIS methods for optimization of epoxy composite filled with Kota stone dust,” *Mater. Today Proc.*, vol. 50, pp. 2371–2375, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.251.
- [27] V. Bhateja, X.-S. Yang, J. Chun-Wei Lin, and R. Das, *Intelligent Data Engineering and Analytics*, no. Ficta. 2023.
- [28] X. Yu, S. Zhang, X. Liao, and X. Qi, “ELECTRE methods in prioritized MCDM environment,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 424, pp. 301–316, 2018, doi: 10.1016/j.ins.2017.09.061.
- [29] F. Maghsoudi Moud, A. Abbaszadeh Shahri, F. van Ruitenbeek, R. Hewson, and M. van der Meijde, “Evaluation of the modified AHP-VIKOR for mapping and ranking copper mineralized areas, a case study from the Kerman metallogenic belt, SE Iran,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.1007/s12517-022-10913-w.
- [30] S. S. Raju, G. B. Murali, and P. K. Patnaik, “Ranking of Al-CSA composite by MCDM approach using AHP–TOPSIS and MOORA methods,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 39, no. 19–20, pp. 721–732, 2020, doi: 10.1177/0731684420924833.
- [31] R. Krishankumar, H. Garg, K. Arun, A. Saha, K. S. Ravichandran, and S. Kar, “An integrated decision-making COPRAS approach to probabilistic hesitant fuzzy set information,” *Complex Intell. Syst.*, vol. 7, no. 5, pp. 2281–2298, 2021, doi: 10.1007/s40747-021-00387-w.
- [32] Akmaludin *et al.*, “Comparison of job position based promotion using: VIKOR, ELECTRE and promethee method,” *Proc. 3rd Int. Conf. Informatics Comput. ICIC 2018*, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/IAC.2018.8780507.
- [33] Z. Chourabi, F. Khedher, A. Babay, and M. Cheikhrouhou, “Multi-criteria decision making in workforce choice using AHP, WSM and WPM,” *J. Text. Inst.*, vol. 110, no. 7, pp. 1092–1101, 2019, doi: 10.1080/00405000.2018.1541434.
- [34] E. Bakhtavar and H. Mahmoudi, “Development of a scenario-based robust model for the optimal truck-shovel allocation in open-pit mining,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 115, 2020, doi: 10.1016/j.cor.2018.08.003.



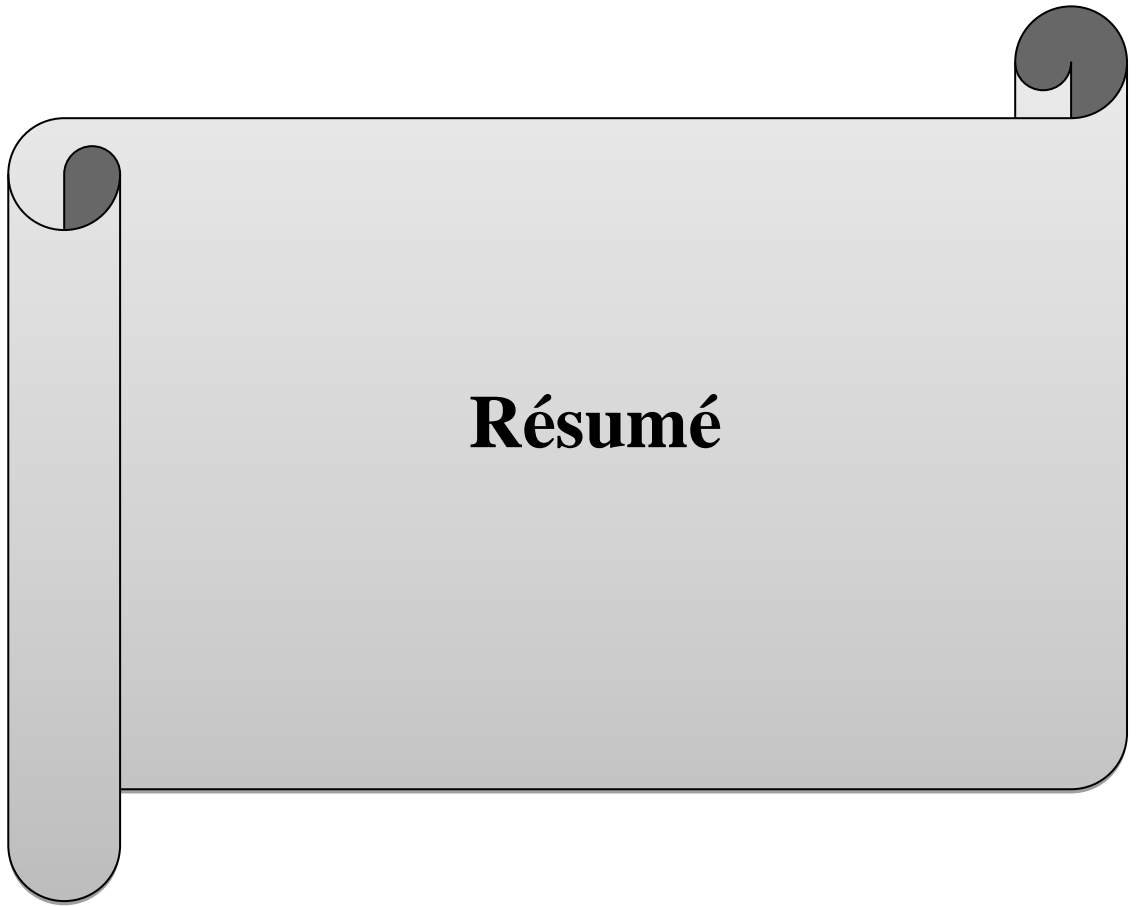
Annexe



N°	EQUIPEMENTS	MARQUE	TYPE	N° SERIE	ANNEE	N° INT	PLACE	CODE	moteur (cv)	Marque du moteur	GodetC ap- (Ton)	ETAT D'ENGN
1	CAMION	CATERPILLAR	773B	63W02963	1990	1302	2		640CV	CAT 3412	60	EPAVE
2	CAMION	CATERPILLAR	773B	63W03739	1992	1304	2		640CV	CAT 3412	60	EPAVE
3	CAMION	CATERPILLAR	773B	63W03731	1992	1314	2		640CV	CAT 3412	60	EPAVE
4	CAMION	HITACHI	EH1000	416LDC77028	2003	1501	2		700CV	QSK	60	EPAVE
5	CAMION	HITACHI	EH1000	416LDC77034	2003	1502	2		700CV	QSK	60	EPAVE
6	CAMION	CATERPILLAR	773 D	7 ER 00543	1997	1317	2	117	691 CV	CAT 3412	60	EPAVE
7	CAMION	CATERPILLAR	773D	7ER00544	1997	1318	2	118	691CV	CAT 3412	60	EPAVE
8	CAMION	CATERPILLAR	771D	6YS00120	1999	1319	2	119	485CV	CAT 3412 HEU	60	EPAVE
9	CAMION	CATERPILLAR	773 E	BDA 00842	2005	1320	2	126	720 CV	CAT 3412 E	60	EPAVE
10	CAMION	CATERPILLAR	773 E	BDA 00854	2005	1321	2	127	720 CV	CAT 3412 E	60	EPAVE
11	CAMION	CATERPILLAR	775 F	TDLS 00721	2008	1322	2	128	751 CV	CAT C27 ACERT	60	PROPOSE A LA RENOVATION
12	CAMION	CATERPILLAR	775 F	PDLS 00722	2008	1323	2	129	751 CV	CAT C27 ACERT	60	PROPOSE A LA RENOVATION
13	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00919	2017	1324	2	130	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
14	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00920	2017	1325	2	131	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
15	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00921	2017	1326	2	132	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
16	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00922	2017	1327	2	133	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
17	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00925	2017	1328	2	134	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
18	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00926	2017	1329	2	135	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
19	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00927	2017	1330	2	136	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
20	CAMION	CATERPILLAR	775 G	RFM 00928	2017	1331	2	137	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
21	CAMION	CATERPILLAR	776 G	RFM 001161	2021	1332	2	137	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
22	CAMION	CATERPILLAR	777 G	RFM 001162	2021	1333	2	137	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
23	CAMION	CATERPILLAR	778 G	RFM 001163	2021	1334	2	137	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE
24	CAMION	CATERPILLAR	779 G	RFM 001174	2021	1335	2	137	780 CV	CAT C27 ACERT	67	MARCHE



N°	EQUIPEMENTS	MARQUE	TYPE	N°SERIE	ANNEE	N°INT	PLACE	CODE	moteur(c v)	Marqued umoteur		ETATD'ENGIN
1	PELLE	PH	1600E	J24401	1983	2	1	251	ELECT5,5 KV			EPAVE
2	PELLE	RUSTON BYC	150RB	39661	1983	1	1	252	ELECT5,5 KV			EPAVE
3	PELLE	KOMATSU	PC1100-6SP	10214	2002	1	1	255	335CV	KOMATSU	400	PANNE
4	PELLE	KOMATSU	PC1250-7	20108	2004	2	1	256	356CV	KOMATSU	400	EPAVE
5	PELLE	KOMATSU	PC1250-7	20109	2004	3	1	257	356CV	KOMATSU	400	PANNE
6	PELLE	TEREXO&K	RH40E	40229	2008	1	1	259	710CV	TEREX	400	EPAVE
7	PELLE	CATERPILLAR	349D2L	TAH00469.	2017	CAT01	1	260	409CV	CAT	350	MARCHE
8	PELLE	LIEBHERR.	R9100.	36060	2017	L01	1	261	757CV	LIEBHERR.	500	MARCHE
9	PELLE	LIEBHERR.	R9100.	36061	2020	L02	1	262	757CV	LIEBHERR.	500	MARCHE
10	CHARGEUSE	CATERPILLAR	988F	8YG00502	1994	3	1	205	320CV	CAT	250	PANNE
11	CHARGEUSE	CATERPILLAR	988B	50W11416	1993	5	1		370CV	CAT		epave
12	CHARGEUSE	CATERPILLAR	988H	BXY2305	2008	6	1	206	480CV	CAT	300	PANNE
13	CHARGEUSE	CATERPILLAR	990K	DJK00259	2017	7		207	766CV	CAT	450	MARCHE



Résumé

Résumé :

Cette thèse a abordé le thème de l'amélioration des normes de chargement et de transport en réduisant les pertes internes et externes en appliquant les méthodologies du processus de hiérarchie analytique (AHP) et de la somme pondérée des produits (WASPAS). Nous avons choisi le meilleur scénario parmi cinq scénarios, chaque scénario contenant 3 chantiers. En répartissant les machines de chargement et de transport sur ces sites selon 5 scénarios différents. Notre objectif est de réduire les temps d'attente des machines de chargement et de transport, tout en augmentant la quantité de production afin de choisir le meilleur scénario en utilisant les techniques AHP et WASPAS.

Summary :

This thesis addressed the theme of improving loading and transport standards by reducing internal and external losses through the application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) methodologies. We selected the best scenario among five, each scenario involving three sites. By distributing the loading and transport machinery across these sites according to five different scenarios, we aimed to reduce the waiting times for loading and transport machines, while increasing the production quantity to choose the best scenario using AHP and WASPAS techniques.

ملخص

تناولت هذه الأطروحة موضوع تحسين معايير التحميل والنقل عن طريق تقليل الخسائر الداخلية والخارجية من خلال تطبيق منهجيات عملية التحليل الهرمي (AHP) وتقييم مجموع المنتجات المرجحة (WASPAS). لقد اخترنا أفضل سيناريو من بين خمسة سيناريوهات، حيث يتضمن كل سيناريو ثلاثة مواقع. من خلال توزيع آلات التحميل والنقل عبر هذه المواقع وفقاً لخمسة سيناريوهات مختلفة، هدفنا إلى تقليل أوقات الإنتظار لآلات التحميل والنقل، مع زيادة كمية الإنتاج لإختيار أفضل سيناريو باستخدام تقنيات AHP و WASPAS.