



DEDICACE

À mon père et à ma mère,

Pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices et votre soutien indéfectible.

Vous avez toujours cru en moi et m'avez donné la force de poursuivre mes rêves.

Ce travail est le fruit de vos encouragements et de vos prières.

Je vous en serai éternellement reconnaissant.

À toute ma famille,

Pour son soutien infaillible.

A tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté une quelconque aide.

Que Dieu, le Miséricordieux, vous accorde d'abondants bienfaits.

Avec tout mon amour et ma gratitude.



REMERCIEMENTS

Il convient de noter que la tenue et le bon déroulement de notre stage, ainsi que la rédaction du présent rapport ont été rendus possibles grâce à certaines personnes envers lesquelles nous tenons à exprimer notre profonde gratitude. De prime abord, nous remercions toute l'équipe d'encadrement de l'Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG), notamment :

- ❖ Pr. Kouakou Alphonse YAO, Directeur de l'ESMG pour le travail colossal qu'il abat à la tête de l'école ;
- ❖ Dr. Jean Claude OKAINGNI, Sous-directeur des Enseignements de l'ESMG pour son dévouement ;
- ❖ M. Michaël NAPON, Enseignant-chercheur à l'ESMG, encadrant de ce Travail de Fin d'Étude pour toute son aide, son suivi et son appui tout au long de notre travail ;
- ❖ Mme. Bintou TRAORÉ Epouse BAMA, Sous-directrice des Etudes de l'ESMG pour son soutien inestimable.

Nous témoignons aussi notre reconnaissance à tout le personnel de Houndé Gold Operations S.A., particulièrement à celui du département Ingénierie.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à :

- ❖ M. Adama SAWAGODO, Directeur Général de la Mine, pour son accueil au sein de la structure.
- ❖ M. Ogou Patrick BROU, Mining Manager de Houndé Gold Operations et notre maître de stage, pour sa confiance, son suivi attentif et ses précieux conseils.
- ❖ M. Ibrahim TOURE, M. Kévin YAMEOGO et Mme Rosalie N'Dri KOFFI, ingénieurs seniors des mines, pour leur soutien constant durant notre stage.

Nous remercions spécialement M. Basile SOME, M. Roland OUEDRAOGO, M. Issa COMPAORE et M. Innocent SORO, pour leur disponibilité constante, leur patience et leur accompagnement.

Nous n'oublions pas le reste du personnel des départements Maintenance et Mining, pour leur hospitalité.

AVANT-PROPOS

L'Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (INP-HB) a été créé par décret n° 96-678 du 4 septembre 1996. Il s'agit d'un établissement public supérieur né de la restructuration de quatre (4) écoles :

- INSET : Institut National Supérieur de l'Enseignement Technique ;
- ENSTP : Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics ;
- ENSA : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie ;
- IAB : Institut Agricole de Bouaké.

L'INP-HB a pour vocation d'assurer la formation de techniciens supérieurs, d'ingénieurs de techniques et d'ingénieurs de conception dans les domaines du commerce, de l'industrie, de l'agronomie, des mines, du génie civil et de l'aéronautique capables de donner un souffle nouveau à l'économie nationale et sous régionale. L'institut est aujourd'hui doté de onze (11) grandes écoles que sont :

- EDP : École Doctorale Polytechnique ;
- EDP-SAPT : École Doctoral Polytechnique des Sciences Agronomiques et des Procédés de Transformation
- EFCPC : École de Formation Continue et de Perfectionnement des Cadres ;
- EPGE : École Préparatoire aux Grandes Écoles.
- ESA : École Supérieure d'Agronomie ;
- ESAS : École Supérieure de l'Aéronautique et du Spatial
- ESCAE : École Supérieure de Commerce et d'Administration des Entreprises ;
- ESCPE : École Supérieure de Chimie, Pétrole et de l'Energie ;
- ESI : École Supérieure d'Industrie ;
- ESMG : École Supérieure des Mines et de Géologie ;
- ESTP : École Supérieure des Travaux Publics ;

L'ESMG dont nous sommes issus a, en son sein, deux cycles de formation : le cycle technicien supérieur et le cycle ingénieur de conception.



Le cycle d'ingénieur de conception forme des experts en mines, carrières et en exploitation et traitement de l'eau, en intégrant des sorties de terrain et des stages en entreprise. En fin de premier semestre de 3^e année, un stage de fin d'études validé par un rapport et soutenu devant un jury est exigé.

Le présent rapport rend compte des travaux réalisés dans ce cadre, lors du stage effectué du **1^{er} mai 2024 au 31 octobre 2024** à Houndé Gold Operations (Endeavour Mining), au Burkina Faso.



TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES EQUATIONS.....	viii
LISTE DE FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xii
GLOSSAIRE	xiii
RESUME.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES.....	3
I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	4
I.1. Historique et création	4
I.2. Statut juridique et siège	4
I.3. Organisation de Houndé Gold Operations	6
II. GÉNÉRALITÉS SUR LA ZONE D'ÉTUDE	8
II.1. Cadre géographique.....	8
II.1.1. Localisation et accès	8
II.1.2. Climat, relief et végétation.....	9
II.2. Cadre géologique.....	10
II.2.1. Géologie du Burkina Faso	10
II.2.2. Géologie locale (zone d'étude).....	12
III. GÉNÉRALITÉS SUR LES ACTIVITÉS À LA MINE D'OR DE HOUNDE	14



III.1. Méthode d'exploitation à la mine d'or de Houndé	14
III.2. Cycle de production minière	15
III.3. Engins et opérations de chargement et de transport	17
III.4. Indicateurs de performance de production minière	21
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	25
I. MATERIEL	26
I.1. Matériel de protection individuelle	26
I.2. Matériel d'acquisition de données.....	27
I.3. Matériel technique.....	27
I.4. Matériel informatique.....	27
II. MÉTHODES	28
II.1. Recherche documentaire	28
II.2. Collecte des données	29
II.2.1. Données de terrain (temps de cycle)	29
II.2.1.1 Mesure des temps de cycle des pelles hydrauliques et du nombre de chargement par heure	29
II.2.1.2. Mesure des temps de cycle des camions	30
II.2.2. Données de bureau	31
II.3. Traitement des données	40
II.3.1. Calcul et analyse des indicateurs de performance.....	40
II.3.1.1. Fiabilité et Maintenabilité.....	40
II.3.1.2. Disponibilité	41
II.3.1.3. Taux de saturation	42
II.3.1.4. Productivité.....	42
II.3.2. Détermination des facteurs influençant les indicateurs de performance.....	43
II.3.3. Etat des lieux des rampes	44



II.3.4.	Evaluation des pertes.....	46
II.3.5.	Mise en place d'un système d'amélioration et apport du système.....	47
CHAPITRE III : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET RECOMMANDATIONS.....		50
I.	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS.....	51
I.1.	Indicateurs de performance et détermination des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 des facteurs qui les influence	51
I.1.1.	Fiabilité et Maintenabilité	51
I.1.2.	Disponibilité.....	54
I.1.3.	Taux de saturation	58
I.1.4.	Productivité	63
I.2.	État des lieux des rampes	68
I.3.	Evaluation des pertes.....	69
II.	RECOMMANDATIONS.....	71
II.1.	Mise en place d'un système d'amélioration.....	71
II.1.1.	Apport de la grille	72
II.2.	Autres recommandations.....	73
CONCLUSION		76
BIBLIOGRAPHIE		77
ANNEXES		i
LISTE DES ANNEXES.....		ii



LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Calcul du temps de cycle d'une pelle hydraulique.....	30
Équation 2 : Calcul du temps de chargement d'un camion par une pelle hydraulique.....	30
Équation 3 : Calcul du temps de cycle de chaque camion	31
Équation 4 : Calcul de la quantité de matériau déplacée par cycle de chargement.....	38
Équation 5 : Calcul du nombre de cycle par heure	38
Équation 6 : Calcul de l'objectif théorique du temps de cycle pour une pelle.....	38
Équation 7 : Calcul de l'objectif réel du temps de cycle pour une pelle.....	39
Équation 8 : Calcul du taux de remplissage du godet	39
Équation 9 : Calcul du nombre de cycles par chargement	39
Équation 10 : Calcul du temps de chargement par DTs.....	39
Équation 11 : Calcul du Mean Time Between Failure (MTBF)	40
Équation 12 : Calcul du Mean Time To Repair (MTTR)	41
Équation 13 : Calcul de la Disponibilité	41
Équation 14 : Calcul du Taux de saturation	42
Équation 15 : Calcul de la productivité	42
Équation 16 : Calcul de la Production.....	42
Équation 17 : Calcul de la largeur sécuritaire d'une rampe "DOUBLE WAY"	44
Équation 18 : Calcul des pertes dues aux temps de cycle	46
Équation 19 : Calcul des pertes associées aux retards opérationnels	47
Équation 20 : Calcul du nombre de camion optimal par pelles	47
Équation 21 : Equation de mise en place de la grille de productivité	48
Équation 22 : Evaluation des gains potentiels de la grille.....	49



LISTE DE FIGURES

Figure 1 : Permis de la mine d'or de HOUNDE (Source : Endeavour Mining, 2017).....	5
Figure 2: Organigramme simplifié de Houndé Gold Operations	6
Figure 3 : Localisation de la mine d'or de Houndé (source : Endeavour Mining, 2017)	9
Figure 4: Carte géologique simplifiée du Burkina Faso (d'après Savadogo, 1984).....	12
Figure 5 : Géologie et structures de Vindaloo Main et de Kari Pump (source : Endeavour Mining, 2027).....	14
Figure 6 : Méthode d'exploitation minière par Fosses emboîtées (D'après Kamulete, 2014) .	15
Figure 7 : Chargement d'un Tombereau rigide en Bottom Loading par une pelle hydraulique KOMATSU PC2000	18
Figure 8: Schéma de temps de cycle d'un camion (ABITO, 2024).....	21
Figure 9 : Importation des DTM sur Haulsim.....	32
Figure 10 : Haulsim présente la fosse et les lieux de déversements sous la même couleur.....	32
Figure 11 : Haulsim présente la fosse et les lieux de déversements sous différentes couleurs	33
Figure 12 : Digitalisation de la route sur Haulsim	33
Figure 13 : Mise en place de la source (Point de chargement) dans Haulsim.....	34
Figure 14 : Insertion des paramètres de la rampe sur Haulsim	34
Figure 15 : Présentation de l'onglet « Fleet Planner » dans Haulsim	35
Figure 16 : Visualisation du rapport dans l'onglet "Fleet Planner" dans Haulsim	35
Figure 17 : Visualisation de la flotte et du temps de cycle théorique des camions dans le logiciel Haulsim	36
Figure 18 : Exportation des données sur EXCEL	36
Figure 19 : Présentation de la feuille EXCEL exportée	37
Figure 20 : Exemple d'un diagramme de Pareto.....	43
Figure 21 : Fonction pour la détermination de la largeur et de la pente des rampes dans GEOVIA SURPAC 6.6.2	45
Figure 22 : Fonction pour la détermination de la forme des rampes dans GEOVIA SURPAC 6.6.2.....	46
Figure 23 : Fiabilité des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 sur la période d'étude.....	51
Figure 24 : Maintenabilité des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 sur la période d'étude (Juin 2024 – Aout 2024).....	52
Figure 25 : Disponibilité des PC 2000 sur la période d'étude	54



Figure 26 : Répartition des pannes de la EX701	55
Figure 27 : Répartition des pannes de la EX702	56
Figure 28 : Répartition des pannes de la EX703	57
Figure 29 : Taux de saturation des PC 2000 sur la période d'étude	58
Figure 30 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour la pelle EX701.....	59
Figure 31 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour pelle EX702.....	60
Figure 32 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour pelle EX703.....	60
Figure 33 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour pelle EX704.....	61
Figure 34 : Productivité des PC 2000 sur la période d'étude	64
Figure 35 : La grille de productivité.....	72



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques de la pelle Hydraulique PC 2000-9	17
Tableau II : Caractéristiques de la pelle Hydraulique PC 2000-11	18
Tableau III : Codes couleurs VINDALO MAIN	19
Tableau IV : Codes couleurs Kari Pump	19
Tableau V : Caractéristiques de Camions HD 785-7	20
Tableau VI : Standby possibles des engins de production	23
Tableau VII : Temps de cycle des camions en fonction de la distance du trajet	62
Tableau VIII : Temps de cycle et temps de chargement obtenus sur la période d'étude	65
Tableau IX : Nombre de camions chargés par heure	66
Tableau X : Pertes dues aux retards opérationnels	69
Tableau XI : Pertes dues aux longs temps de chargement	70
Tableau XII : Apport économique de la grille de productivité proposée	72



LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

BIA : Bureau d'Ingénierie et d'Assistance (Entreprise spécialisée dans les services et équipements miniers exerçant à la Mine de Houndé)

°C : Degré Celcius

Cf. : Confère

DT ou DTs : Dump Truck ou Dump Trucks

FCFA : Franc de la Communauté Financière Africaine

GET: Ground Engaging Tools

HD: Heavy Duty (Lourd)

Km : Kilomètre

Kv: Kilovolt

MER : Month End Report (Rapport de fin du mois)

PM : Preventive Maintenance (Maintenance préventive)

S.A. : Société Anonyme

T : Tonne

T/H : Tonne/Heure

TSF : Tailing Storage Facility (Installation de stockage des résidus miniers)



GLOSSAIRE

Delay : Les retard opérationnels.

Dumper : Les engins de transports HD 785.

Heave : Le soulèvement ou le déplacement de matériaux ou de roches causé par des pressions internes, souvent à la suite d'activités telles que le dynamitage.

PC 2000 : Pelle sur Chenille pesant 200 tonnes.

Rompad : Lieu de stockage du minéral.

Sheeting : Le fait de remblayer un endroit donné avec du matériau plus dur.

Stand-by : Arrêt d'un équipement alors qu'il n'a pas de panne particulière.

Toe : Roche resté en place après dynamitage alors qu'elle devrait être fragmentée.



RESUME

La majorité des Pelles hydrauliques PC 2000 utilisées pour les opérations de production à la mine d'or de Houndé a eu du mal à atteindre leurs objectifs liés aux indicateurs clés de performance depuis le début de l'année jusqu'en mai 2024. Dans le cadre de notre démarche d'amélioration continue, nous avons choisi, lors de notre travail de fin d'étude, de mener une étude portant sur les "**Améliorations techniques des performances des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 dans le processus de chargement**" couvrant la période de juin à août 2024. L'objectif de cette étude est de mesurer et d'analyser les indicateurs clés de performance afin d'identifier les facteurs influençant les performances des PC 2000 et de proposer des mesures correctives adaptées. Les méthodes adoptées comprenaient une recherche documentaire et une collecte de données suivie de leur traitement. Nous avons également mis en place un système d'amélioration et évalué son impact sur la production. Les principaux résultats montrent que certaines rampes présentaient des contraintes structurelles, avec des largeurs inférieures à la norme (18 m au lieu de 22 m) et des pentes moyennes de 13% au lieu de 10 %, affectant la fluidité du trafic et augmentant les temps d'attente. La disponibilité des pelles a été limitée par des temps de pannes prolongés et récurrentes respectivement pour les PC 2000 EX702, EX703 et EX701. Tandis que leur taux de saturation atteignait 76 %, soit légèrement en dessous de l'objectif de 78 %, principalement en raison de déplacements excessifs et des temps d'attente. La PC 2000 EX704 a été la seule à atteindre ses objectifs de productivité, alors que les autres pelles ont connu des déficits de performance en raison des longs temps de chargement, principalement causés par la présence de gros blocs après dynamitage. Tous ces dysfonctionnements ont provoqué une perte globale de plus de 1 200 000 de tonnes sur la période étudiée. Pour pallier ces lacunes, nous avons introduit une grille de productivité visant à améliorer l'allocation des camions, accompagnée de recommandations telles que, le respect strict des dimensions des rampes et l'amélioration continue des paramètres de forage et de dynamitage. Si la grille et les recommandations sont mises en œuvre, la quantité minimale supplémentaire que nous pourrions déplacer sur une période de 3 mois est estimée à 103 000 tonnes.

Mots clés : Indicateurs de performance, Temps de chargement, Amélioration continue, KOMATSU PC 2000, Exploitation minière.



ABSTRACT

The majority of the PC 2000 hydraulic shovels used for production operations at the Houndé Gold Mine have had difficulty in achieving their key performance indicator targets from the beginning of the year until May 2024. As part of our continuous improvement approach, we chose to carry out a study as part of our end-of-study work on '**Technical improvements of KOMATSU PC 2000 hydraulic shovels performances in the loading process**', covering the period from June to August 2024. The aim of the study is to measure and analyse key performance indicators in order to identify the factors influencing the performance of the PC 2000 and to propose appropriate corrective measures. The methods adopted included documentary research and data collection followed by processing. We also set up an improvement system and assessed its impact on production. The main results show that some ramps had structural constraints, with widths below the standard (18 m instead of 22 m) and average gradients of 13 % instead of 10 %, affecting traffic flow and increasing waiting times. Excavator availability was limited by prolonged and recurring breakdowns for the PC 2000 EX702, EX703 and EX701 respectively. While their saturation rate reached 76 %, slightly below the target of 78 %, mainly due to excessive travel and waiting times. The PC 2000 EX704 was the only shovel to meet its productivity targets, while the other shovels experienced performance shortfalls due to long loading times, mainly caused by the presence of large blocks after blasting. All these malfunctions resulted in an overall loss of more than 1 200 000 tonnes over the period studied. To remedy these shortcomings, we introduced a productivity grid aimed at improving truck allocation, accompanied by recommendations such as strict compliance with ramp dimensions and continuous improvement of drilling and blasting parameters. If the grid and recommendations are implemented, the minimum additional quantity we could move over a 3-month period is estimated at 103 000 tonnes.

Key words: Performance indicators, Loading time, Continuous improvement, KOMATSU PC 2000, Mining.

INTRODUCTION

L'exploitation minière à grande échelle a considérablement évolué au fil des décennies et permet désormais d'extraire les ressources plus efficacement. La mine d'or de Houndé au Burkina Faso illustre ce développement en s'imposant comme l'une des principales sources de production d'or de la sous-région Ouest-Africaine. Depuis sa création, la mine a joué un rôle important dans l'économie minière du pays.

Cependant, au fur et à mesure que les volumes de production augmentent, les exigences en matière de performance des engins de production augmentent également. Il est donc opportun de faire un choix judicieux des machines de chargement et de transport et de bien les affecter pour limiter les temps d'attente et d'augmenter les rendements, ce qui aboutira bien sûr, à la réalisation de la production planifiée. **(KEBAR et al., 2011)**. C'est dans ce sens que les pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 ont été choisies pour assurer la majorité des opérations de chargement des matériaux à la mine d'or de Houndé.

Malgré leur importance stratégique, ces pelles rencontrent des difficultés qui affectent la productivité globale, engendrant des coûts supplémentaires et impactant négativement l'avancée des opérations. En effet, de janvier à mai 2024, les performances des PC 2000 n'ont pas atteint les objectifs fixés. Face à cette situation, nous avons entrepris une étude de leurs performances de juin à août 2024, dans le cadre de la démarche d'amélioration continue. C'est dans ce contexte que nous avons travaillé sur le thème : **"Améliorations techniques des performances des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 dans le processus de chargement à la mine d'or de Houndé "**.

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les performances des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000. Pour y parvenir, quatre objectifs spécifiques ont été établis :

- Calculer les indicateurs de performance des PC 2000 et faire ressortir les paramètres qui influencent ces derniers ;
- Évaluer les pertes générées par le processus actuel et mettre en place un système d'amélioration ;
- Évaluer l'impact de ce système d'amélioration sur la production.



Pour aborder cette étude, le rapport est structuré en trois chapitres. D'abord, une présentation générale de la mine d'or de Houndé, des équipements utilisés et du thème. Ensuite, les méthodes et les outils d'analyse adoptés pour mesurer et évaluer les performances seront exposés. Enfin, une analyse des résultats qui permettra de dégager des interprétations et des recommandations précises pour améliorer les performances des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000.



CHAPITRE I : GENERALITES



I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

I.1. Historique et création

Endeavour Mining Limited (EML) est une entreprise minière canadienne dont le siège est situé à Toronto. Créée dans les années 1980, l'entreprise a su se développer rapidement et diversifier ses opérations à l'échelle internationale.

Aujourd'hui, Endeavour Mining Limited est active dans plusieurs régions du globe, notamment en Afrique de l'Ouest, en Amérique du Nord et du Sud, ainsi qu'en Australie et dans les Îles du Pacifique. En Afrique de l'Ouest, ses opérations au Burkina Faso sont sous la responsabilité de sa filiale, Endeavour Mining Burkina Faso (EMBF), qui a été établie en 2017.

Depuis janvier 2024, l'entreprise est dirigée par Monsieur Ian Cockeril. Sous sa direction, Endeavour Mining Burkina Faso (EMBF) gère l'exploitation de la mine de Houndé. Située dans la région des Hauts-Bassins, à environ 250 kilomètres au Sud-Ouest de Ouagadougou, la capitale burkinabè, la mine de Houndé représente un atout stratégique majeur pour Endeavour Mining.

Il est prévu que la mine d'or de Houndé produise annuellement plus de 260 000 Onces, avec une durée de vie estimée à plus de 10 ans, consolidant ainsi la position de l'entreprise sur le marché aurifère et contribuant significativement à ses performances globales. **(Endeavour Mining, 2017)**

I.2. Statut juridique et siège

Houndé Gold Operations S.A. est une Société Anonyme établie conformément aux lois burkinabè avec un capital social de 10 millions de FCFA. Cela fait d'elle une entité juridique entièrement régie par le droit du Burkina Faso. **(Endeavour Mining, 2017)**

Cette société est majoritairement détenue par Endeavour Mining, qui possède 90% des parts, tandis que l'État burkinabè détient les 10% restants, reflétant un partenariat public-privé dans l'exploitation minière.

Le cadre réglementaire de l'exploitation de la mine est défini par le décret N°2015-090/PRES/TRANS/PM/MEF/MERH, daté du 5 février 2015. Ce décret a été émis par le gouvernement du Burkina Faso et accorde à Houndé Gold Operations S.A. le permis d'exploitation industrielle pour une grande mine d'or.

Le siège social de Houndé Gold Operations S.A. est situé à Ouagadougou, la capitale du Burkina Faso, précisément dans le quartier Ouaga 2000. Cet emplacement central assure une coordination efficace des opérations et un accès direct aux institutions gouvernementales et aux parties prenantes locales.

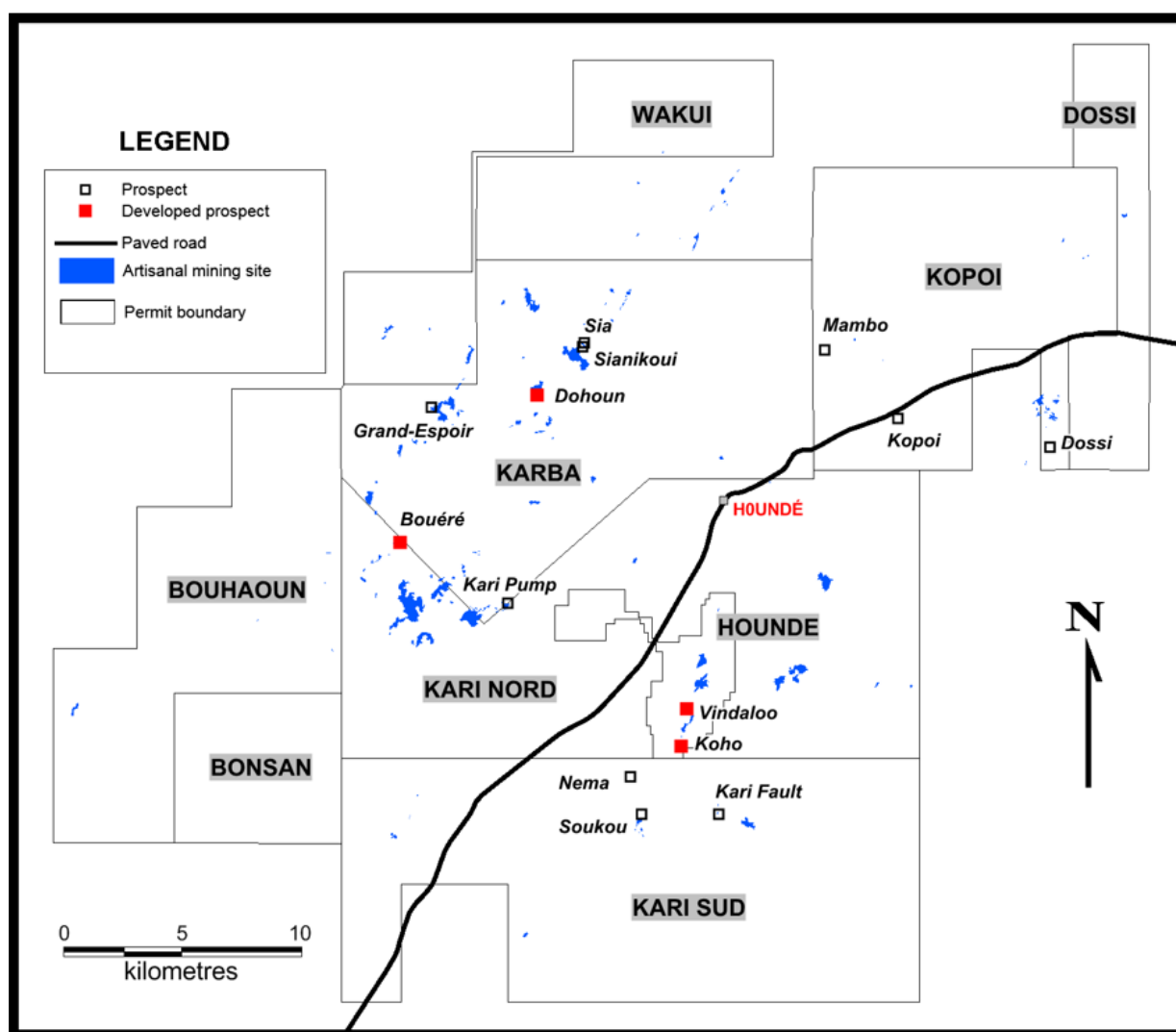


Figure 1 : Permis de la mine d'or de HOUNDE (Endeavour Mining, 2017)

I.3. Organisation de Houndé Gold Operations

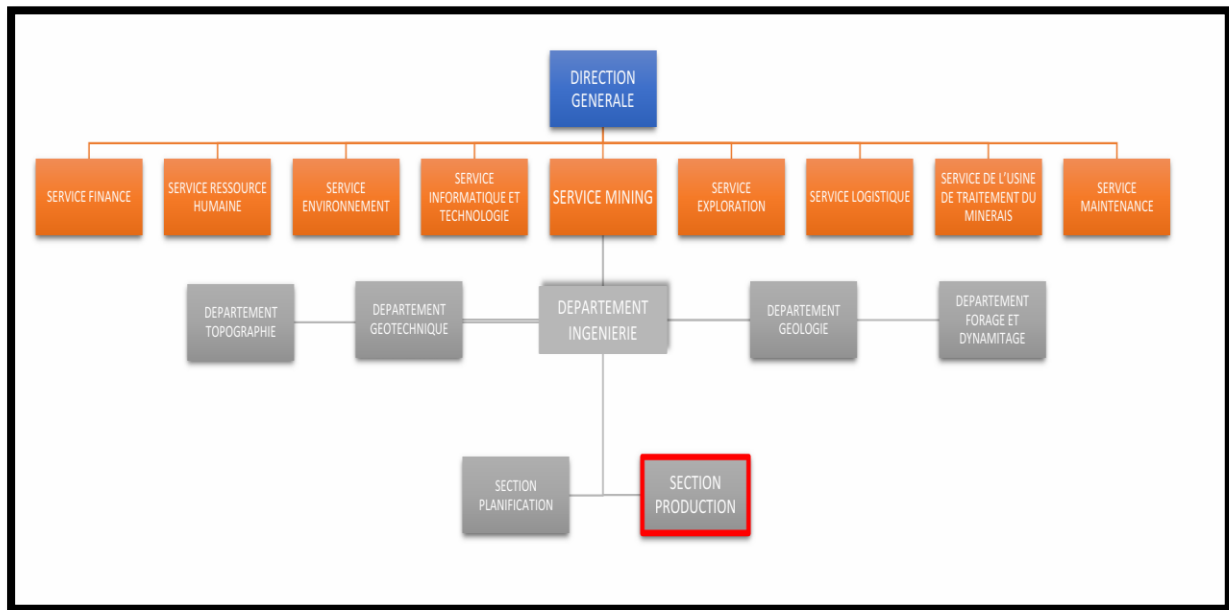


Figure 2: Organigramme simplifié de Houndé Gold Operations

La mine d'or de Houndé est organisée sous une direction générale qui supervise les aspects juridiques, administratifs et financiers. Cette direction s'appuie sur plusieurs services opérationnels chargés de mettre en œuvre les programmes d'activités. Chaque service se divise en départements, eux-mêmes composés de sections. Parmi ces sections, se trouve la section Production, où nous avons réalisé notre stage. Au sein du service Mining, on retrouve :

❖ Le département Ingénierie

Dans ce département, nous avons essentiellement deux (02) sections que sont la planification et la production.

- ✓ **La section Planification** : Elle fixe les objectifs à court, moyen et long terme de l'exploitation minière. Elle conçoit les plans de la mine et prépare les calendriers de production. Les ingénieurs de planification collaborent permanemment avec les autres départements pour garantir des opérations efficaces, sûres et respectueuses de l'environnement.



- ✓ **La section Production** : Cette section assure l'extraction du minerai. Elle supervise les opérations quotidiennes, gère les équipes et veille à atteindre les objectifs de production tout en respectant les normes de sécurité. Elle est aussi responsable de l'entretien des équipements et de l'amélioration continue des processus pour maximiser l'efficacité.

❖ **Le département Topographie**

Ce département fournit des données géospatiales précises et à jour, essentielles pour la planification et l'exécution des opérations minières. Les topographes réalisent des levés détaillés du terrain et cartographient les zones d'exploitation. Ce département est indispensable pour la réalisation de chacun des travaux dans la fosse.

❖ **Le département Géotechnique**

Ce département évalue les conditions du sol et des roches pour assurer la stabilité des excavations et des infrastructures minières. Il effectue des études géotechniques, analyse les risques de glissement de terrain et propose des solutions pour les atténuer. Les géotechniciens travaillent en collaboration directe avec les ingénieurs de planification et de production pour intégrer les données géotechniques dans les plans de la mine.

❖ **Le département Forage et Dynamitage**

Ce département est responsable de la conception et de l'exécution des opérations de forage et de dynamitage. Il planifie et supervise les activités de forage, sélectionne les explosifs appropriés pour maximiser la fragmentation du minerai tout en minimisant les impacts environnementaux et les vibrations. L'objectif principal de ce département est de rendre accessible le minerai à temps et en toute sécurité.

❖ **Le département Géologie**

Ce département étudie et analyse les formations géologiques du site minier. Il identifie et évalue les gisements de minerais en utilisant des techniques de cartographie géologique, de forage exploratoire et d'échantillonnage. Les géologues fournissent des informations incontournables pour la planification des opérations d'extraction et l'évaluation des réserves de minerais. Leur expertise permet d'améliorer continuellement l'extraction des ressources et de garantir la rentabilité à long terme de la mine.



II. GÉNÉRALITÉS SUR LA ZONE D'ÉTUDE

II.1. Cadre géographique

Dans cette section, nous établirons la géographie de la zone d'étude afin de mieux comprendre l'environnement dans lequel nous évoluons.

II.1.1. Localisation et accès

La zone d'exploitation minière de Houndé se situe dans la province du Tuy, dans la région des Hauts-Bassins du Burkina Faso, en Afrique de l'Ouest. Ce projet minier, baptisé Houndé, portait dès le départ uniquement sur les gisements de Vindaloo et de Madras NW, situés à environ 250 km au sud-ouest de Ouagadougou, la capitale du pays.

Les gisements se trouvent à environ 2,7 km de la route nationale N°1 et à 200 mètres d'une ligne électrique de 225 Kv reliant (Ouagadougou à Abidjan). La ville de Houndé est proche de cette zone d'exploitation et compte environ 23 000 habitants.

Par ailleurs, une ligne ferroviaire reliant le port d'Abidjan en Côte d'Ivoire à Ouagadougou passe à environ 25 km à l'ouest de la zone de dépôt minier.

Cette proximité aux infrastructures de transport et d'énergie constitue un atout majeur pour le développement du projet minier de Houndé, facilitant l'acheminement des matériaux et l'accès à l'électricité nécessaire pour les opérations.



Figure 3 : Localisation de la mine d'or de Houndé (Endeavour Mining, 2017)

II.1.2. Climat, relief et végétation

La zone de permis minier de Houndé se situe dans la savane de la zone climatique soudanaise, influencée par la mousson ouest-africaine, contrairement à la zone sahélienne située au nord du Burkina Faso.

Selon les données de la station météorologique de Bobo-Dioulasso, située à près de 90 km à l'Ouest, la température moyenne annuelle est de 27 °C sur une période de 22 ans, avec des extrêmes enregistrés allant de 43 °C en avril à 9 °C en décembre. La région connaît une saison des pluies de juin à octobre, suivie d'une saison sèche le reste de l'année.

Pour établir la climatologie de base du projet, les données météorologiques historiques mensuelles et quotidiennes ont été collectées auprès de deux stations situées à proximité :

- la station climatique de Houndé, à 6,3 km au nord du site du projet,
- la station climatique de Boromo, à 74,7 km au nord-est du site du projet.

La mine se trouve à une altitude d'environ 320 mètres au-dessus du niveau de la mer et présente une topographie principalement plane, ponctuée de crêtes de latérites arrondies à abruptes atteignant parfois 20 mètres de hauteur. La zone est traversée par des cours d'eau saisonniers peu profonds orientés du Nord-Est vers l'Est. La plupart des zones sont recouvertes d'une fine couche de terre sur une base de latérite, avec des alluvions à proximité des cours d'eau et des drainages. Les affleurements locaux incluent des roches volcaniques et des sédiments, notamment une grande crête de roches méta-volcaniques située à environ 5 km à l'ouest de la zone de dépôt.

La végétation de la région est composée d'arbres espacés de 1 à 100 mètres, avec des densités plus élevées dans les zones de drainage. Pendant la saison des pluies, les herbes couvrent les zones non agricoles, souvent brûlées après la saison sèche.

II.2. Cadre géologique

La géologie du Burkina Faso et de la zone d'étude sera étudiée de manière générale afin de fournir une compréhension claire et concise de ses caractéristiques. Cette analyse inclura l'identification des types de roches présents, leur structure, ainsi que la disposition des formations géologiques.

II.2.1. Géologie du Burkina Faso

Le Burkina Faso est constitué de près de 85 % (**CIEH, 1988**) par un bloc de formations cristallines du précambrien C et D, recouvert en discordance, sur les frontières nord et nord-ouest du pays, par les sédiments du précambrien A du bassin de Taoudéni, et sur la frontière sud-est par les sédiments de la bordure septentrionale du bassin voltaïen (**précambrien A à Éocambrien**). Dans la plaine du Gondo, à l'extrême Nord-Ouest, les dépôts continentaux tertiaires (Continental terminal) se superposent directement aux formations du précambrien A. (**Barrère et Slansky, 1965 ; D.G.M., 1967**). Les dépôts du Continental terminal recouvrent également les formations du Précambrien C et D à l'Est.



Les formations du précambrien D ou Entébirrimien sont essentiellement des granitoïdes de 2660 ± 135 MA d'âge. Celles du précambrien C ou birrimien constituent des sillons étroits, à remplissage de volcanites, pyroclasties, volcano-sédimentaires et argilo-gréseux. Elles ont dû se mettre en place vers 2300 MA (**Hottin et Ouédraogo, 1975**). La sédimentation du Précambrien A aurait débuté vers 1000 MA (**Ouédraogo, 1981**) ou vers 1300 MA (**Hottin et Ouédraogo, 1975**).

La tectonique se traduit par les orogénies libériennes, éburnéenne et panafricaine. L'orogénie libérienne se manifeste par une tectonique d'ensemble du substratum Antébirrimien difficile à préciser. La tectonique éburnéenne débute par un stade précoce de fracturation du bâti Antébirrimien. Cette fracturation s'est faite suivant deux directions prédominantes :

- une direction variant de N-NE (bordure Ouest du noyau Mossi) à franchement NE (bordure Est et Nord-Est du noyau Mossi) ;
- et une direction N80-O à N60-O (bordure nord du noyau Mossi).

Les formations du groupe sédimentaire terminal recouvrent, en discordance, entre 2170 et 2100 MA, les volcano-sédiments et le socle. Les phases tectoniques majeures de l'orogénie éburnéenne affectent, entre 2100 et 1950 MA, la totalité du Burkina Faso. (**Ouedraogo, 1994**).

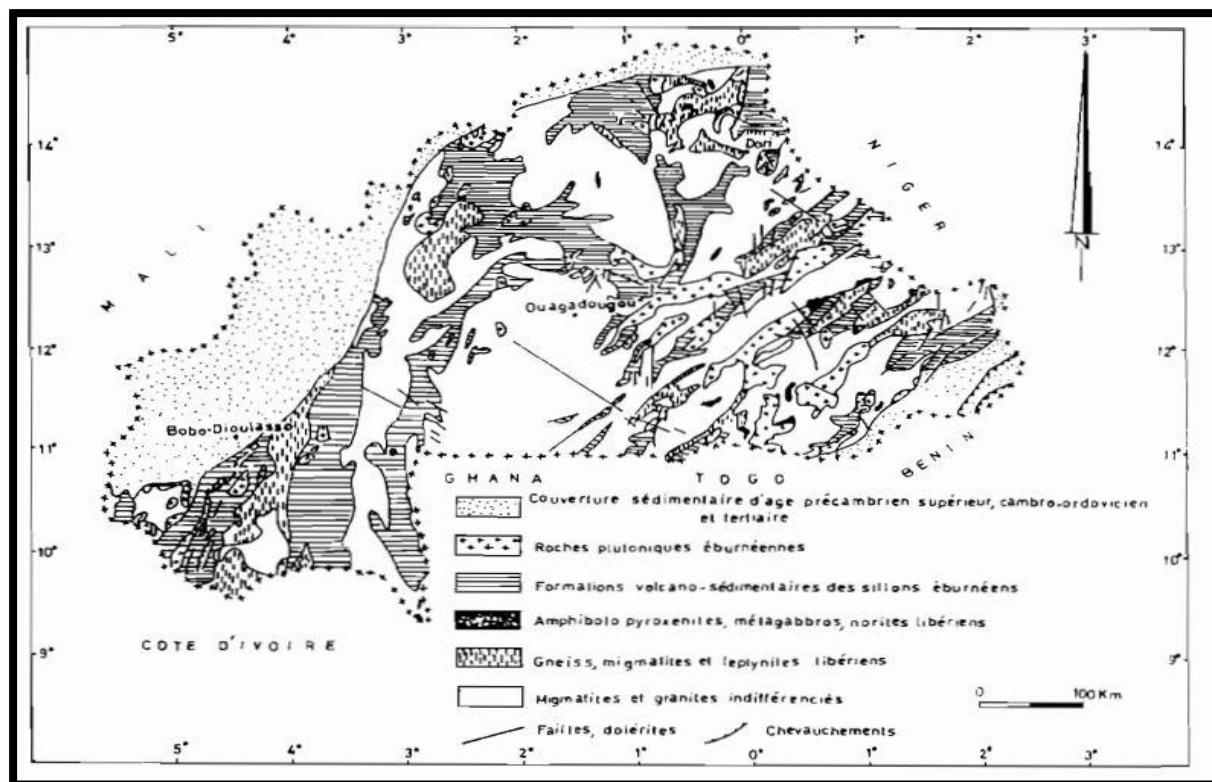


Figure 4: Carte géologique simplifiée du Burkina Faso (Savado, 1984)

II.2.2. Géologie locale (zone d'étude)

La mine de Houndé est située dans la ceinture de roches vertes de Houndé, un ensemble géologique birimien se trouvant entre le bassin sédimentaire de Taoudéni et les formations du Baoulé-Mossi. Cette région a été marquée par d'importantes intrusions granitoïdiques orientées Nord-Est/Sud-Ouest.

A Vindalo Main, la croûte birimienne comprend les lithologies suivantes, du bas vers le haut :

- ✓ Une épaisse séquence de roches mafiques, incluant le basalte, la dolérite et le gabbro, de composition tholéitique, localement intercalées avec des sédiments détritiques immatures et des calcaires ;
- ✓ Des sédiments détritiques constitués de roches volcaniques, de turbidites, de mudstones et de carbonates, avec des roches volcaniques calco-alcalines interstratifiées ;
- ✓ Une séquence sédimentaire clastique grossière appartenant au Groupe Tarkwaïen.

Au cours de l'orogénèse éburnéenne, ces roches volcaniques et métasédimentaires ont été soumises à un raccourcissement crustal, associé à un métamorphisme régional des faciès schistes verts. Localement, des faciès métamorphiques amphibolites sont observés, bien que ceux-ci soient interprétés comme résultant d'un métamorphisme de contact. Dans la zone de Vindaloo NW, les roches, orientées du nord au nord-est, sont constituées de volcaniques et de sédiments intermédiaires, métamorphisés par les schistes verts, ainsi que de dykes de gabbro. La minéralisation dans ces zones se trouve dans des intrusions mafiques intensément séricitisées et silicifiées, ainsi que dans des volcanoclastiques intermédiaires à mafiques, cisailés et altérés de manière similaire. La minéralisation se présente souvent sous forme de stockwerks de quartz, avec une pyritisation faible à modérée. L'ensemble minéralisé présente généralement une orientation NW-SE et pend vers le NE.

Le gisement de Kari Pump se distingue par une géologie complexe et bien définie, reposant sur une interprétation lithologique approfondie réalisée à partir de données géologiques précises. Le profil géologique révèle des couches successives de latérite, de saprolite, de saprock (ou zone de transition), et de roche fraîche, modélisées en fonction des données obtenues lors des sondages.

La latérite et la saprolite sont particulièrement épaisses à Kari Pump, avec une épaisseur moyenne respectivement de 12 mètres pour la latérite et de 60 mètres pour la saprolite. Cette superposition d'altérations reflète un processus géologique de longue durée, ayant entraîné la formation de ces horizons distincts.

Le type de Roche que l'on trouve à Kari Pump sont Les Volcano-Mafiques, les Brèches et les sédiments.

Les zones susceptibles de présenter la minéralisation sont les zones broyées, celles présentant de Quartz, des Séricites et des Sulfures. Il y a aussi la présence des zones dites graphitées qui contiennent le plus souvent du minerai.

La minéralisation à Kari Pump est préférentiellement orientée N-S et il y a deux sens de pendage E et W car le bloc model se présente comme un bol.

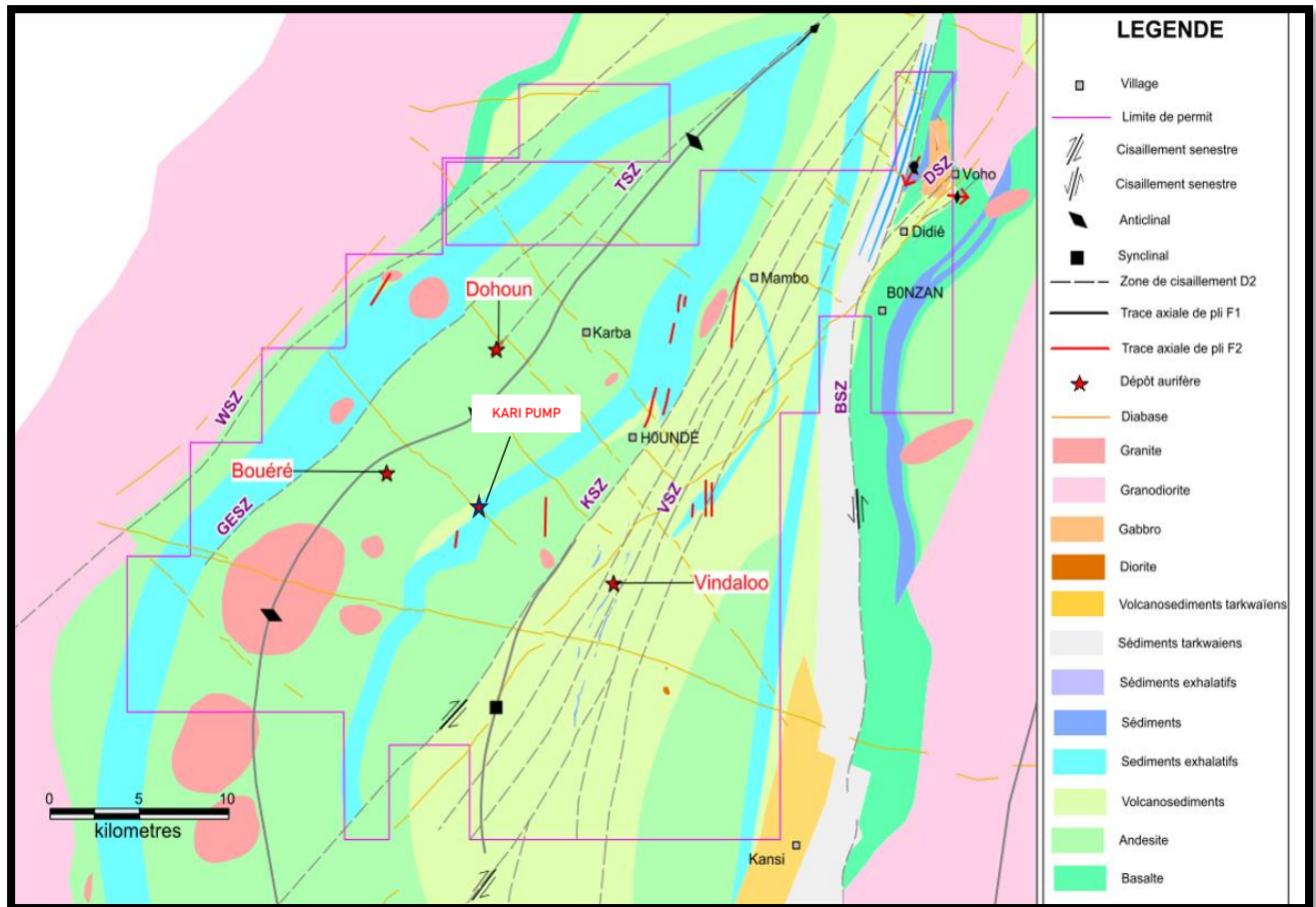


Figure 5 : Géologie et structures de Vindaloo Main et de Kari Pump (Endeavour Mining, 2027)

III. GÉNÉRALITÉS SUR LES ACTIVITÉS À LA MINE D'OR DE HOUNDÉ

Dans ce paragraphe, nous aborderons les aspects généraux liés à notre thème. Il s'agira de présenter les concepts fondamentaux, les éléments de base et les contextes pertinents pour bien comprendre le cadre de notre analyse.

III.1. Méthode d'exploitation à la mine d'or de Houndé

La mine d'or de Houndé utilise une méthode d'exploitation à ciel ouvert, choisie pour sa compatibilité avec la géologie du gisement, la profondeur de la substance minérale et son efficacité économique et opérationnelle.

Cette méthode consiste à extraire les minerais directement de la surface terrestre en enlevant les couches de sol et de roche qui recouvrent les dépôts de minerai, particulièrement efficace pour les gisements proches de la surface et permettant une extraction à grande échelle.

La technique employée à Houndé repose sur le concept de fosses emboîtées : une première fosse est creusée, suivie de plusieurs autres qui s'emboîtent successivement. L'accès au point le plus profond du gisement se fait progressivement, au fur et à mesure de l'exploitation. Les différents niveaux de ces fosses sont atteints par excavation directe dans les zones d'oxyde à l'aide de pelles hydrauliques et par dynamitage dans les zones de roche dure.

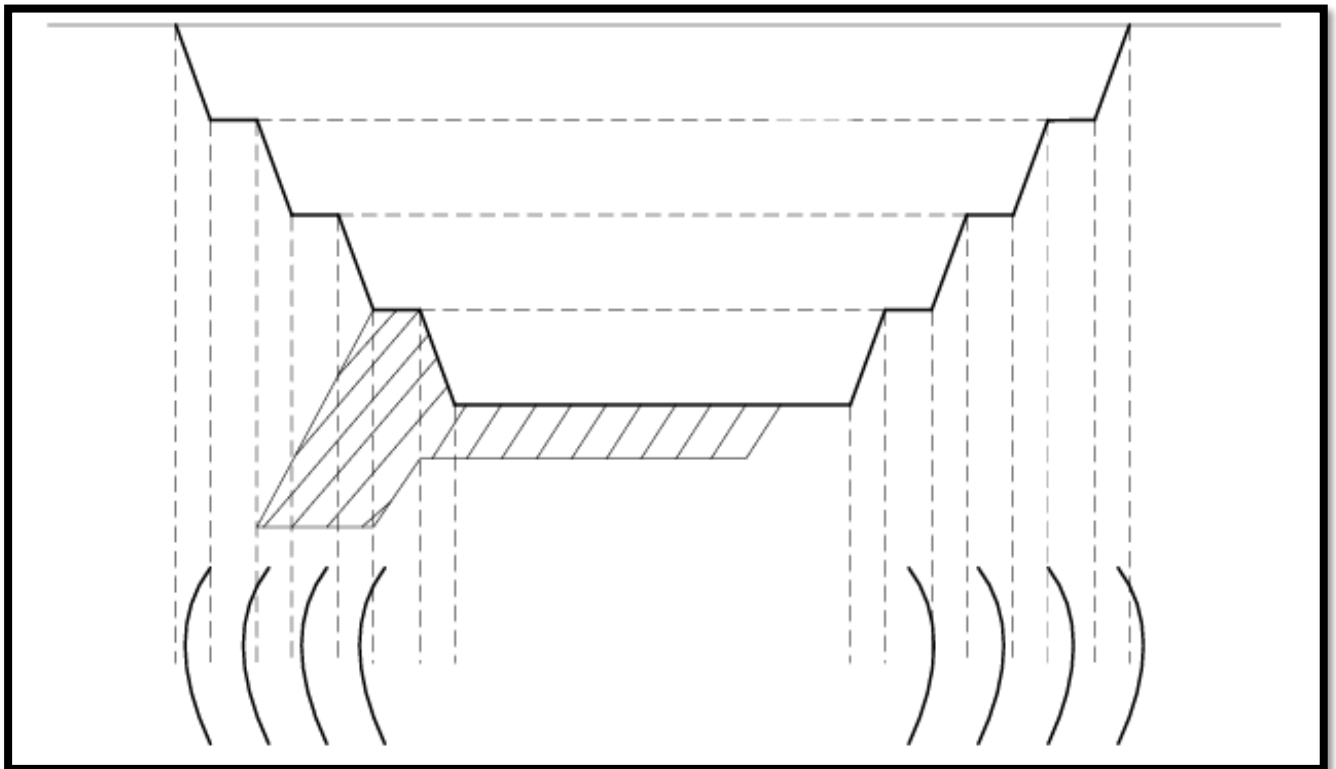


Figure 6 : Méthode d'exploitation minière par Fosses emboîtées (Kamulete, 2014)

III.2. Cycle de production minière

La production minière fait référence à l'extraction de ressources minérales de la terre tels que des métaux précieux (comme l'or, l'argent), des minéraux industriels (comme le cuivre, le fer) ou des matériaux de construction (comme le sable, le gravier).

Elle peut être mesurée en termes de volume de matière extraite ou de la quantité de métal ou de minéraux récupérés après traitement.

Le succès de cette production dépend de facteurs tels que la qualité du minerai, l'efficacité des techniques d'extraction, de traitement et de la gestion des coûts.

La production minière englobe plusieurs étapes clés qui, ensemble, constituent le cycle de production minière.

Toutes les phases de ce cycle sont interconnectées et la performance à chaque phase influence directement la productivité globale de la mine. Par exemple, une extraction efficace dépend de la précision de l'exploration, tout comme un traitement réussi repose sur la qualité du transport du minerai.

Le cycle de production minière est l'ensemble des activités successives permettant l'extraction, le transport et le traitement du minerai. À la mine d'or de Houndé, ce cycle suit une série d'étapes clés, chacune jouant un rôle déterminant dans l'efficacité générale de l'exploitation.

Dans un premier temps il y a le forage de contrôle de teneur ou Grade Control qui permet essentiellement d'évaluer la teneur en or du minerai.

Elle inclut plusieurs sous-activités telles que :

- Le forage et la collecte d'échantillons : des forages sont réalisés pour extraire des échantillons de roche sous forme de débris. Ces échantillons sont ensuite collectés pour être analysés.
- La préparation et l'analyse chimique : les échantillons sont préparés mécaniquement, puis analysés chimiquement pour déterminer leurs teneurs en or.

Ensuite, nous avons la compilation des résultats et la modélisation géologique où les données issues de l'analyse sont compilées pour modéliser la géologie du gisement. Cela permet de cibler les zones les plus riches en minerai pour l'excavation.

La prochaine étape consiste au forage et dynamitage. En effet, lorsque le matériau à excaver est trop dur, le dynamitage est nécessaire. Le forage est utilisé pour placer des charges explosives dans la roche, permettant ainsi de la fragmenter pour faciliter l'extraction.

Enfin, la dernière phase avant le traitement est tournée vers l'excavation, le chargement et le transport des matériaux.

Cette phase est au cœur de notre étude. Elle implique l'excavation du matériau de la fosse, son chargement dans des camions et son transport vers les installations de traitement ou les zones de stockage. L'efficacité de cette phase dépend largement de la performance des équipements, notamment des pelles hydrauliques pour le chargement et des camions pour le transport.

Dans notre projet, une attention particulière est portée à l'amélioration des temps de cycle des pelles hydrauliques. En réduisant ces temps de cycle, nous pourrions augmenter la quantité de matériaux déplacée chaque jour, ce qui améliore directement la productivité de la mine.

III.3. Engins et opérations de chargement et de transport

Les engins de chargement utilisés dans les différentes fosses à la mine d'or de Houndé sont principalement des pelles hydrauliques, toutes de la marque KOMATSU et leur nombre total s'élève à neuf (09). Parmi celles-ci, cinq (05) sont directement dédiées à la production minière. Plus précisément, il s'agit d'une pelle hydraulique KOMATSU PC 3000 et de quatre pelles KOMATSU PC 2000. Ces machines jouent un rôle essentiel dans le processus d'excavation, assurant le chargement du matériau dans les camions pour son transport vers sa destination selon que ce soit du minerai ou du stérile.

En plus de ces pelles de production, la mine dispose de quatre (04) autres pelles KOMATSU PC 1250. Bien que ces machines soient le plus souvent utilisées pour la production, elles sont priorisées pour les tâches connexes. Cependant, nous ne leur tenons pas rigueur quant à l'atteinte de leurs différents objectifs de production.

En outre, des pelles KOMATSU PC 500 sont présentes sur le site, mais elles sont gérées par des sous-traitants. Ces pelles sont principalement utilisées pour des travaux auxiliaires, comme le talutage, le déplacement des tuyaux et le curage pour les Sheeting.

Les caractéristiques des excavatrices de production à Endeavour Mining Houndé sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I : Caractéristiques de la pelle Hydraulique PC 2000-9

PC 2000-8 (EX 701-702-703)	
Capacité du godet (Mètre cube)	11
Portée maximale (Mètre)	15,78
Réservoir carburant (Litre)	3400
Nombre	03

Tableau II : Caractéristiques de la pelle Hydraulique PC 2000-11

PC 2000-11R (EX 704)	
Capacité du godet (Mètre cube)	12
Portée maximale (Mètre)	15,78
Réservoir carburant (Litre)	3400
Nombre	01

Le chargement du matériau est réalisé par des pelles hydrauliques, avec des couches de 3 mètres, 2,5 mètres, ou 5 mètres d'épaisseur, en fonction de deux critères principaux : le type de matériau et la fosse où se déroule le chargement. À la mine d'or de Houndé, le mode de chargement le plus couramment utilisé est le « bottom loading ». Dans ce procédé, la pelle charge les camions tout en étant positionnée sur le tas abattu, tandis que les camions sont situés à un niveau inférieur, généralement au pied du banc excavé. Cette méthode favorise un bon temps de chargement en réduisant les mouvements de la pelle.



Figure 7 : Chargement d'un Tombereau rigide en Bottom Loading par une pelle hydraulique KOMATSU PC2000

Le chargement du minerai est organisé selon la délimitation des zones identifiées par des flagelles de couleur correspondant aux différentes teneurs.

Tableau III : Codes couleurs VINDALO MAIN

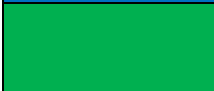
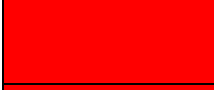
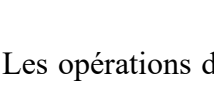
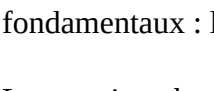
COULEURS	DENOMINATION	TENEUR (g /t)
	MW : Mineral Waste (Stérile minéralisé)	0.3-0.6
	LG : Low Grade (Faible teneur)	0.6-1.4
	MG : Medium Grade (Moyenne teneur)	1.4-2.2
	HG : High Grade (Forte teneur)	2.2-4
	SHG : Super High Grade (Très forte teneur)	4 <

Tableau IV : Codes couleurs Kari Pump

COULEURS	DENOMINATION	TENEUR (g /t)
	MW : (Stérile minéralisé)	0.3-0.5
	LLG : (Très faible teneur)	0.5-0.8
	LG : (Faible teneur)	0.8-1.2
	MG : (Moyenne teneur)	1.2-2.2
	HG : (Forte teneur)	2.2-4
	SHG (Très forte teneur)	4 <

Les opérations de transport à la mine d'or de Houndé reposent sur deux types d'équipements fondamentaux : les camions bennes et les tombereaux rigides HD 785-7.

Les camions bennes sont exploités par TROPIC Mining, un sous-traitant, pour le transfert du minerai de Kari à Houndé ; plus précisément au Rompad proche de l'unité de traitement.

Les tombereaux rigides quant à eux, sont la propriété directe de Houndé Gold Operations.

Ces tombereaux rigides, également appelés "Dumpers", sont spécialement conçus pour transporter de grandes quantités de matériaux, qu'il s'agisse de stériles ou de minerai. Leur conception robuste leur permet de faire face aux exigences des conditions minières difficiles, notamment les grandes distances à parcourir et la présence de rampe plus ou moins raides. Grâce à leur capacité de charge élevée et leur envergure, ils sont particulièrement adaptés aux besoins de la mine.

Tableau V : Caractéristiques de Camions HD 785-7

HD 785-7	
Capacité du godet (Mètre cube)	12
Charge utile (Tonne)	100
Vitesse Maximale (Km /h)	65
Réservoir carburant (Litre)	1308
Nombre disponible en moyenne	32

Le fonctionnement des tombereaux suit un cycle rigoureux et bien organisé. Une fois que le tombereau est chargé par une pelle hydraulique, il emprunte une rampe pour se rendre à sa destination, qui peut être une verse à stérile, un dépôt de minerai, ou tout autre emplacement désigné en fonction des besoins opérationnels. Arrivé à destination, le tombereau décharge son contenu, puis retourne sans délai à la zone de chargement pour répéter ce cycle. Ce processus continu permet de maintenir un flux constant de matériaux, essentiel à l'efficacité globale de l'exploitation minière.

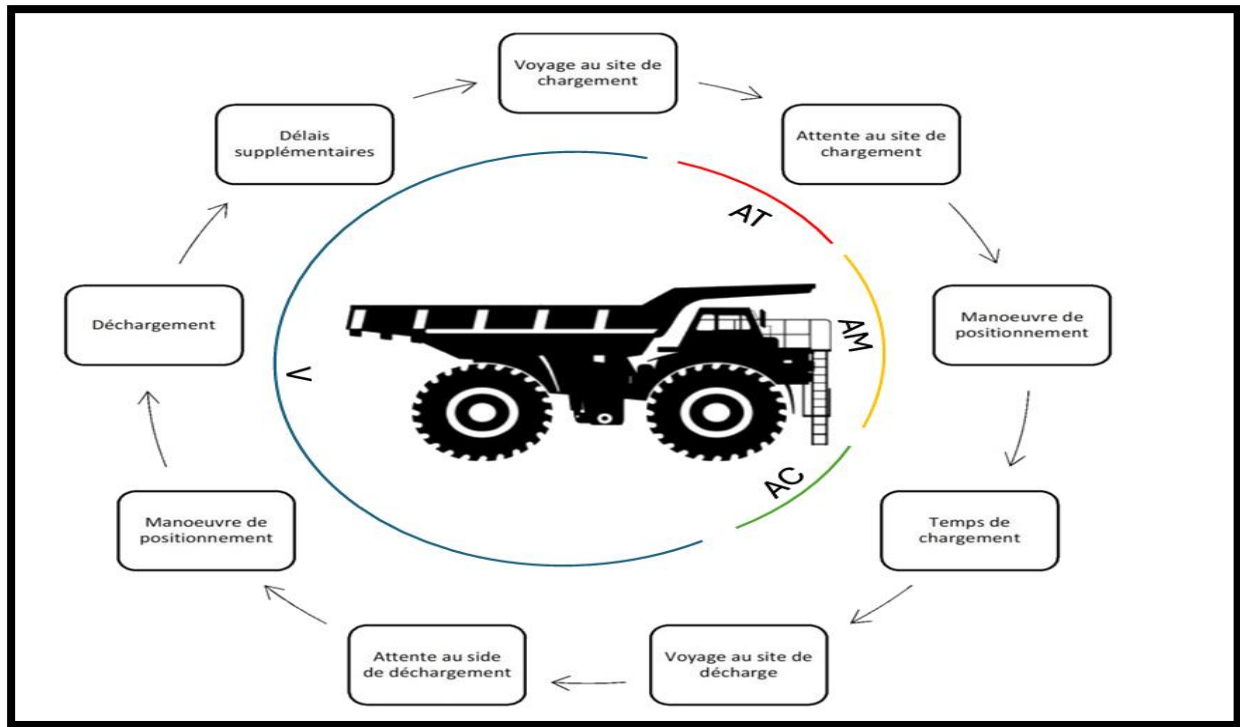


Figure 8: Schéma de temps de cycle d'un camion (ABITO, 2024)

Pour assurer une coordination optimale entre les différents intervenants, un système de codes couleurs est utilisé (**Tableau IV et Tableau V**). Ce système permet d'identifier facilement le type de matériau transporté, facilitant ainsi la communication entre les opérateurs et réduisant les risques d'erreurs (dilution, minerais au Waste Dump) lors des opérations de déchargement.

III.4. Indicateurs de performance de production minière

Un indicateur de performance, souvent désigné par l'acronyme KPI (Key Performance Indicator) ou ICP (Indicateur Clé de Performance), est une mesure quantitative qui permet à une organisation de suivre et d'évaluer l'évolution de ses activités ou de ses processus internes par rapport aux objectifs stratégiques qu'elle s'est fixés. Dans le secteur minier, la performance des équipements, en particulier ceux destinés aux opérations de chargement et de transport, est principalement mesurée à travers trois paramètres essentiels : la disponibilité, le taux de saturation et la productivité des engins.

Cela inclut les engins de chargement et de transport de matériaux (comme les pelles hydrauliques, les tombereaux et les camions-bennes).

La gestion efficace de ces indicateurs à travers divers paramètres peut ainsi conduire à une amélioration des opérations de chargement et de transport.

Dans notre étude, nous considérons la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, le taux de saturation, le temps de cycle et la productivité.

III.4.1. Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité des engins

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. **(Lafontaine, 2006).**

Dans des conditions données d'utilisation, la maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. **(Lafontaine, 2006).**

Ces deux paramètres sont étroitement liés à la disponibilité qui est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens nécessaires est assurée. **(Lafontaine, 2006).**

Elle est impactée par les arrêts mécaniques tels que les maintenances programmées ou préventives (PM services), les maintenances non programmées ou correctives (pannes) et les délais ou réparations en attente de ressources.

Les maintenances programmées (PM services) sont des entretiens planifiés en fonction des heures d'utilisation des engins (250, 500, 1000, 2000 heures) pour prévenir les pannes et maintenir les machines opérationnelles.

Les maintenances non programmées (correctives) sont des interventions après une panne imprévue, causant des arrêts mécaniques et réduisant la disponibilité des engins.

Les délais ou réparations en attente de ressources sont les temps d'attente pour les opérations de maintenance en raison du manque de ressources comme pièces de rechange ou équipements de maintenance nécessaires.



III.4.2. Taux de saturation

C'est un indicateur qui permet de mesurer l'efficacité de l'utilisation d'un engin. Il est principalement influencé par les périodes de « stand-by » ou de « pause ».

Tableau VI : Standby possibles des engins de production

STAND-BY	DESCRIPTION
Opération de dynamitage	Temps d'arrêt des engins pendant les opérations de dynamitage pour des raisons de sécurité.
Réunion de début de poste et changement de poste	Période d'arrêt durant laquelle la réunion avant le début du poste est effectuée avant de commencer un nouveau poste.
Pause fatigue	Arrêts prévus pour permettre aux opérateurs de se reposer dans la nuit et de réduire les risques liés à la fatigue.
Climat	Arrêts causés par des conditions météorologiques défavorables qui empêchent le travail en toute sécurité.
Carburant	Temps d'attente pour le ravitaillement en carburant des engins.
Déplacement de pelle	Arrêts des camions pendant les déplacements des pelles d'un banc à un autre.
Manque d'opérateur	Périodes d'inactivité des engins en raison de l'absence d'opérateurs disponibles.
Embourbement	Arrêts d'un camion dus à l'immobilisation des engins dans des sols boueux.
Manque de camion	Temps d'attente des pelles pour le chargement des matériaux en raison d'un nombre insuffisant de camions disponibles.
Pannes des pelles	Arrêts des camions provoqués par des pannes ou des défaillances techniques des pelles.



III.4.3. Productivité et Temps de cycle

Le temps de cycle des pelles hydrauliques correspond à l'intervalle entre le début du remplissage et la fin du vidage d'un godet dans un camion.

Le temps de chargement quant à lui correspond à l'intervalle entre le début du remplissage du 1er godet et le vidage du dernier godet dans un camion.

En parallèle, le temps de cycle des engins de transport se réfère à l'intervalle entre les débuts de remplissages successifs pour un même camion.

La productivité, quant à elle, est définie comme la quantité de matériau transportée par unité de temps, exprimée en Tonne/Heure (T/H).



CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

I. MATERIEL

Pour la réalisation de notre étude, il a été utilisé des données, des logiciels et des outils. Dans ce paragraphe, il s'agira de décrire et de présenter le matériel utilisé.

Nous ferons cas ici de trois (04) types de matériels :

- ✚ Le matériel de protection individuelle ;
- ✚ Le matériel d'acquisition de données ;
- ✚ Le matériel technique ;
- ✚ Le matériel informatique.

I.1. Matériel de protection Individuelle

Dans le secteur de l'exploitation minière, la santé et la sécurité des travailleurs sont des priorités absolues lors de l'exécution de chaque tâche. À cet égard, Houndé Gold Operations (HGO) s'engage fermement à respecter les normes les plus strictes en matière de sécurité au travail.

Afin de garantir que toutes les activités se déroulent dans un environnement sécurisé, la société met à la disposition de ses employés un ensemble complet d'Equipements de Protection Individuelle (EPI). Ces équipements sont essentiels pour protéger les travailleurs contre les risques potentiels liés à leurs tâches quotidiennes sur le site minier.

Le kit d'EPI fourni comprend :

- ✓ Un casque de sécurité qui protège la tête contre les chocs et les chutes d'objets.
- ✓ Des lunettes de protection pour protéger les yeux contre les projections et la poussière.
- ✓ Des gants de protection protégeant les mains contre les coupures, produits chimiques, et autres risques.
- ✓ Des chaussures de sécurité pour les pieds avec des coques renforcées et des semelles antidérapantes.
- ✓ Des vêtements à bandes fluorescentes pour une visibilité constante des travailleurs.
- ✓ Une protection auditive à savoir des bouchons pour réduire l'exposition au bruit.
- ✓ Un masque respiratoire contre la poussière et les substances nocives.

I.2. Matériel d'acquisition de données

Ce sont les outils utilisés principalement pour l'acquisition de données. Nous avons utilisé les éléments suivants :

- ✓ Un carnet de note et un stylo pour consigner les observations du terrain ;
- ✓ Un Chronomètre pour chronométrer les temps de cycle des engins de production ;
- ✓ Un appareil photo pour prendre des photos illustratives des observations effectuées sur le terrain ;
- ✓ La fiche d'annotation des temps de cycle pour noter les temps de cycle réels des engins de production. **(Cf. Annexe I et II).**

I.3. Matériel technique

Ce sont principalement :

- ✓ La base de données de production quotidienne du service production, couvrant la période de janvier à septembre 2024 ;
- ✓ Les manuels de la société **KOMATSU** pour obtenir les caractéristiques techniques et industrielles des engins de production ;
- ✓ La base de données du service de maintenance pour accéder aux informations sur les heures de maintenance des engins de production.

I.4. Matériel informatique

Les logiciels utilisés dans cette étude incluent plusieurs outils métiers essentiels pour l'analyse des données. Parmi eux :

- ✓ Microsoft Excel 2016, un tableur qui a servi à traiter les données et à produire des graphiques pour visualiser les résultats.
- ✓ HAULSIM 3.6, un logiciel de simulation minière développé par RPM Global, utilisé pour estimer les temps de cycle des engins de transport.
- ✓ Geovia Surpac 6.6.2, un outil de planification et de modélisation minière développé par Dassault Systèmes, utilisé pour mesurer les distances entre les zones de chargement et les déverses, calculer les angles de pente des rampes, déterminer leur largeur et visualiser leurs formes.



II. MÉTHODES

Nous allons décrire les étapes suivies du début jusqu'à la fin de l'étude.

II.1. Recherche documentaire

Dans le cadre de la recherche documentaire de ce rapport, plusieurs sources et types de documents ont été exploités pour fournir une base théorique et pratique solide.

Nous avons :

- ❖ Les documents relatifs à la production minière et aux indicateurs de performance des engins de production minière qui nous ont permis d'avoir les informations techniques et méthodologiques sur les processus d'exploitation minière et l'évaluation des performances des équipements. Ces sources incluent des rapports d'exploitation, des manuels d'utilisation, des études de cas, ainsi que des normes industrielles.
- ❖ Les articles scientifiques qui ont apporté une dimension académique et théorique à l'étude. Ils sont issus de revues spécialisées et traitent de thématiques comme l'optimisation des cycles de chargement, l'analyse des temps d'attente, et les études comparatives sur les performances des équipements miniers. Ces articles permettent de comprendre les pratiques adoptées dans d'autres projets similaires.
- ❖ La documentation sur les logiciels Excel, Haulsim et Surpac qui est également une source précieuse pour le traitement et l'analyse des données. Nous avons utilisé Excel pour structurer et analyser les données collectées sur le terrain, en créant des tableaux et des graphiques qui facilitent la présentation des résultats. Haulsim, en tant qu'outil de simulation, nous a permis d'avoir le temps de cycle théorique de camions, tandis que Surpac nous a permis de faire la cartographie de nos rampes.
- ❖ Les fiches techniques des engins KOMATSU, notamment des pelles hydrauliques PC 2000 et des tombereaux, fournissent des données précises sur les caractéristiques des machines : capacités des godets et Volume du réservoir par exemple. Ces informations techniques ont été fondamentales pour évaluer les performances actuelles des engins et proposer des améliorations concrètes en vue d'atteindre les objectifs de productivité.

II.2. Collecte des données

Nous avons recueilli des données réelles et théoriques pour notre analyse. Les données réelles comprennent principalement les temps de cycle mesurés sur le terrain pour les pelles hydrauliques et les camions. En plus de cela, il y a le nombre de camions chargés par heure pour les pelles hydrauliques. Toutes ces données offrent une vue concrète de la performance des équipements en conditions réelles.

Les données théoriques, quant à elles, proviennent de diverses sources et outils de modélisation. Par exemple, nous avons utilisé le logiciel Haulsim pour simuler et estimer les temps de cycle des camions dans différents scénarios opérationnels. D'autres données théoriques incluent la disponibilité des équipements, leur taux de saturation, leur fiabilité et leur maintenabilité.

Ces indicateurs sont calculés à partir des informations extraites des bases de données de production et de maintenance, puis traités via des feuilles de calcul Excel.

En combinant ces données réelles et théoriques, nous visons à obtenir une compréhension complète et équilibrée des performances actuelles des équipements, ainsi que des opportunités d'amélioration pour accroître l'efficacité du processus de chargement avec les pelles KOMATSU PC 2000.

II.2.1. Données de terrain (temps de cycle)

Pour obtenir des données réelles sur les temps de cycle des engins, nous avons utilisé un **chronomètre** pour mesurer précisément chaque étape du processus de chargement et de transport. Ces mesures sont par la suite notées sur des **fiches de terrain (Cf. Annexe I et II)**. Cette méthode nous permet de déterminer les temps de cycle des pelles hydrauliques et des camions de manière distincte.

II.2.1.1. Mesure des temps de cycle des pelles hydrauliques et du nombre de chargement par heure

Le temps de cycle des pelles suit une série d'évènements à réaliser que sont :

- ❖ **Le Temps de déversement (Td)** : Le temps nécessaire pour vider le godet.
- ❖ **Le Temps de retour à vide (Trv)** : Le temps nécessaire pour que la pelle revienne à sa position initiale pour recommencer le cycle.

- ❖ **Le Temps de rotation chargé (Trc) :** Le temps pris par la pelle pour pivoter et déposer le matériau dans le camion.
- ❖ **Le Temps de chargement (Tc) :** Le temps nécessaire pour remplir le godet de la pelle avec le matériau.

Ce Temps de cycle (**Tcycle**) correspond donc à la somme des temps de ces différents événements et est donné par l'équation (2) suivante :

$$\mathbf{T_{cycle} = T_d + T_{rc} + T_{rv} + T_c}$$

Équation 1 : Calcul du temps de cycle d'une pelle hydraulique

Notons qu'en plus du temps de cycle de la pelle, nous pouvons calculer le temps de chargement par camion qui est donné par l'équation suivante :

$$\mathbf{T_{charg} = \sum_{(i=1 \text{ à } i=k)} T_{cycle}(i)}$$

Équation 2 : Calcul du temps de chargement d'un camion par une pelle hydraulique

Tcharg : Temps de chargement d'un camion

i : Numéro du cycle de la pelle

k : Nombre de cycles

II.2.1.2. Mesure des temps de cycle des camions

Le transport consiste à déplacer le matériau de la zone de chargement à la zone de déchargement. Comme mentionné plus haut, les fiches de temps de cycle des camions ont été essentielles pour déterminer le temps de cycle des camions sur le terrain. Cela impliquait de monter à bord de différents camions pour chronométrer les durées des différentes étapes du transport (cf. **Figure 8**) :

- ❖ **Le temps de chargement (AC)** : ce temps débute avec le premier godet et se termine avec le dernier godet, lorsque la benne est complètement remplie.
- ❖ **Le temps de Roulage en charge (RC)** : correspond au déplacement de la zone de chargement à la zone de déchargement.
- ❖ **Le temps de déchargement (V)** : temps nécessaire pour vider le contenu de la benne.
- ❖ **Le temps de Roulage à vide (RV)** : déplacement de la zone de déchargement jusqu'à la zone de chargement.
- ❖ **Le temps d'Attente ou autres délais (AT)** : ces délais peuvent survenir aussi bien à la zone de déchargement qu'à celle de chargement.

Le temps de cycle des camions est la somme de tous ces temps et peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\text{Temps de cycle des camions (Tc)} = AC + RC + V + RV + AT$$

Équation 3 : Calcul du temps de cycle de chaque camion

II.2.2. Données de bureau

Ces données proviennent de simulations effectuées à l'aide du logiciel HAULSIM ainsi que de calculs ou d'extractions réalisés à partir de feuilles de calculs Excel.

II.2.2.1. Détermination du temps de cycle théorique des camions

Ce temps est calculé à l'aide du logiciel Haulsim en suivant plusieurs étapes bien définies et organisées.

La première étape consiste à importer dans Haulsim les données au format «.dtm » créées avec Surpac. Pour cela, on va dans l'onglet « File » et on sélectionne « Import Spatial Data ».

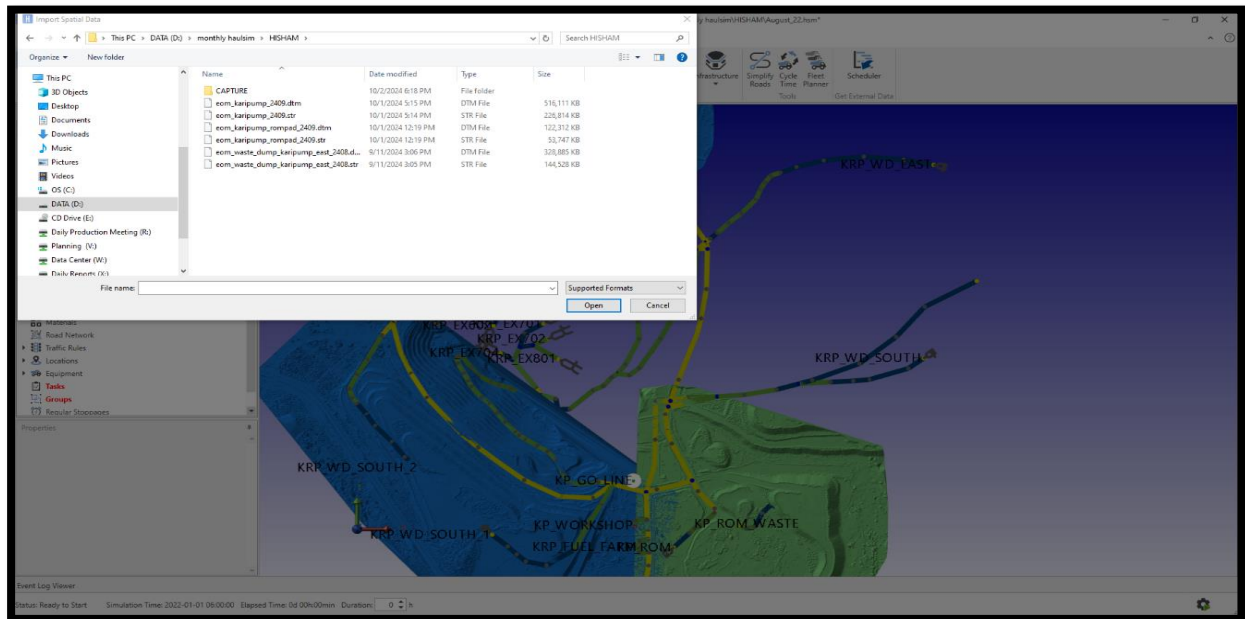


Figure 9 : Importation des DTM sur Haulsim

Ensuite, il est nécessaire de changer la couleur de la fosse, car elle est identique à celle des zones de déchargement. Pour ce faire, on effectue un clic droit sur le DTM dans « Navigator » et on choisit « Set Color ».

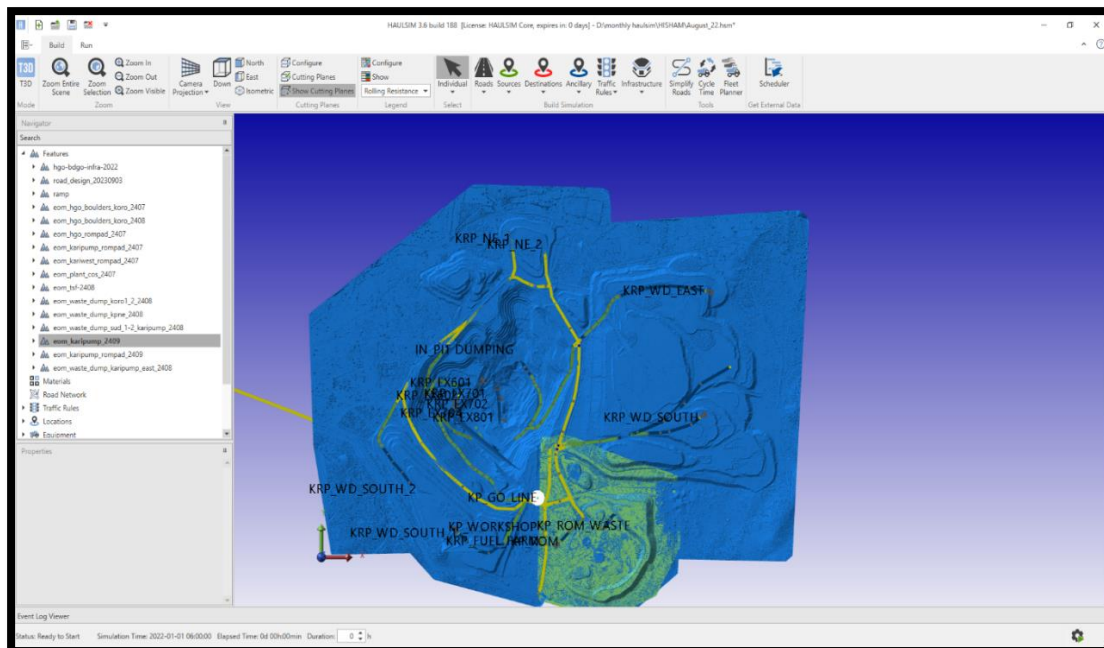


Figure 10 : Haulsim présente la fosse et les lieux de déversements sous la même couleur

Après changement on obtient :

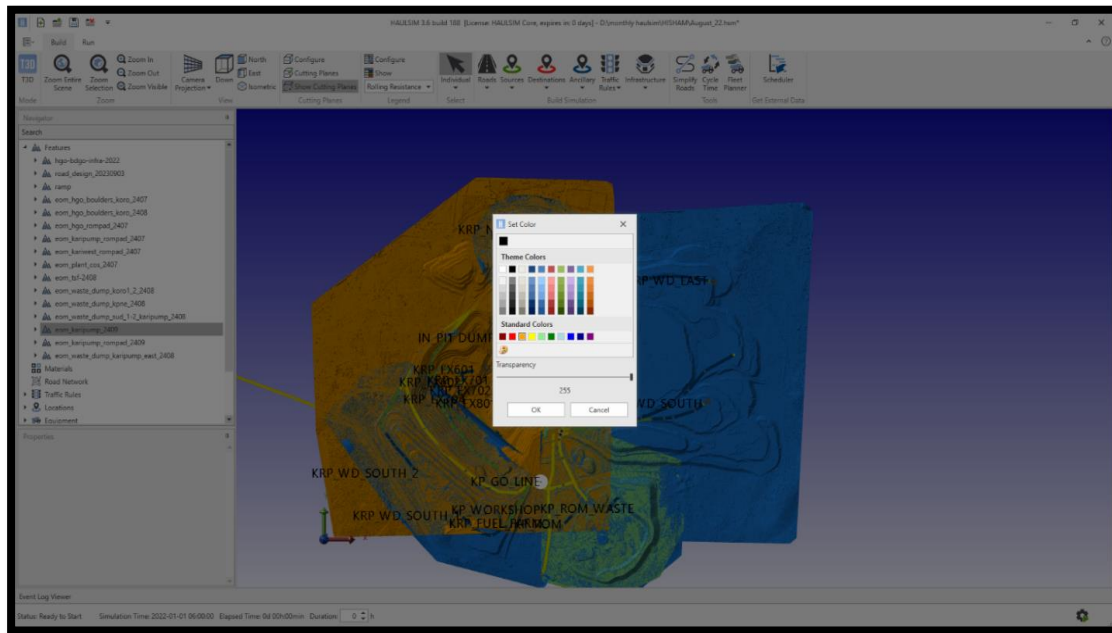


Figure 11 : Fosse et les lieux de déversements sous différentes couleurs sur Haulsim

L'étape suivante consiste à digitaliser la route.

Pour cela, on accède à l'onglet « Road » et on clique sur « Draw Road ».

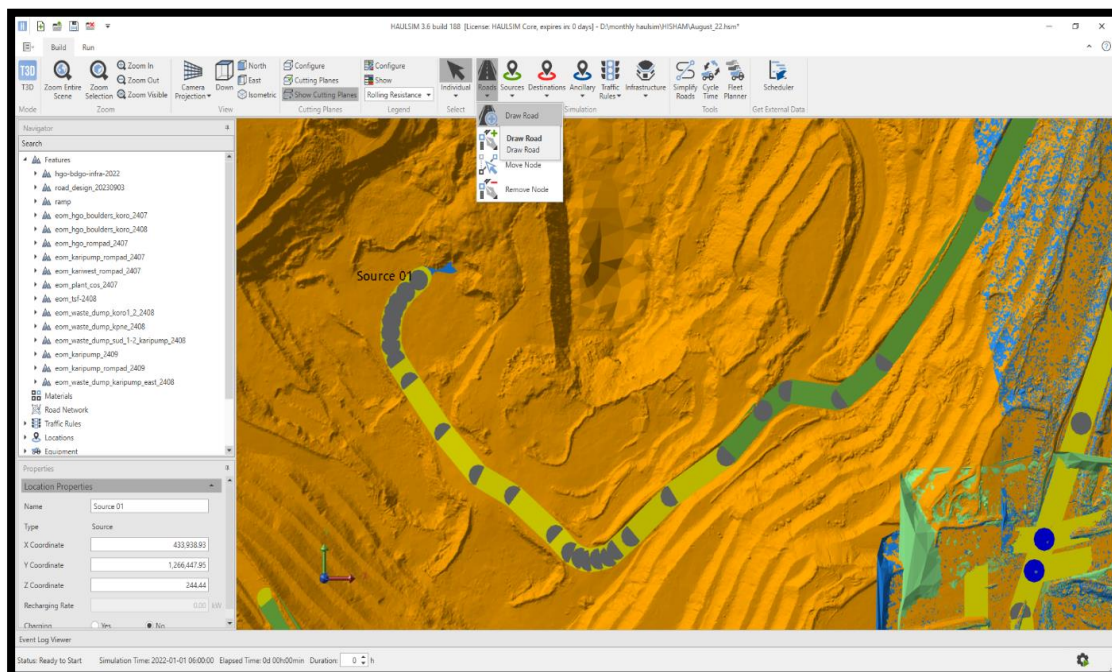


Figure 12 : Digitalisation de la route sur Haulsim

Après avoir tracé la route, il faut configurer la source, c'est-à-dire le lieu de chargement des camions. On clique sur l'onglet « Source », puis sur « Load and Haul ».



Figure 13 : Mise en place de la source (Point de chargement) dans Haulsim

La cinquième étape consiste à insérer les paramètres de la rampe en tenant compte des conditions réelles du terrain.

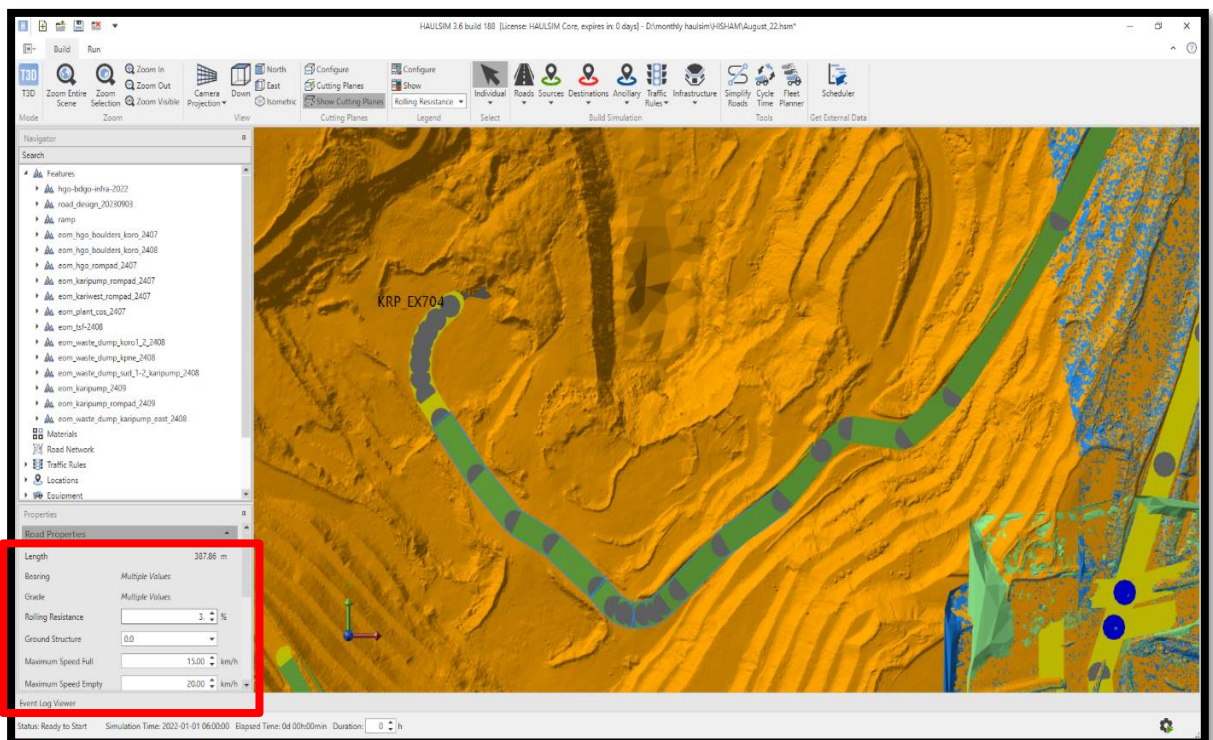


Figure 14 : Insertion des paramètres de la rampe sur Haulsim

Une fois les paramètres de la rampe entrés, on peut visionner le rapport en cliquant sur l'onglet « Fleet Planner », ce qui fait apparaître une fenêtre contenant le rapport.

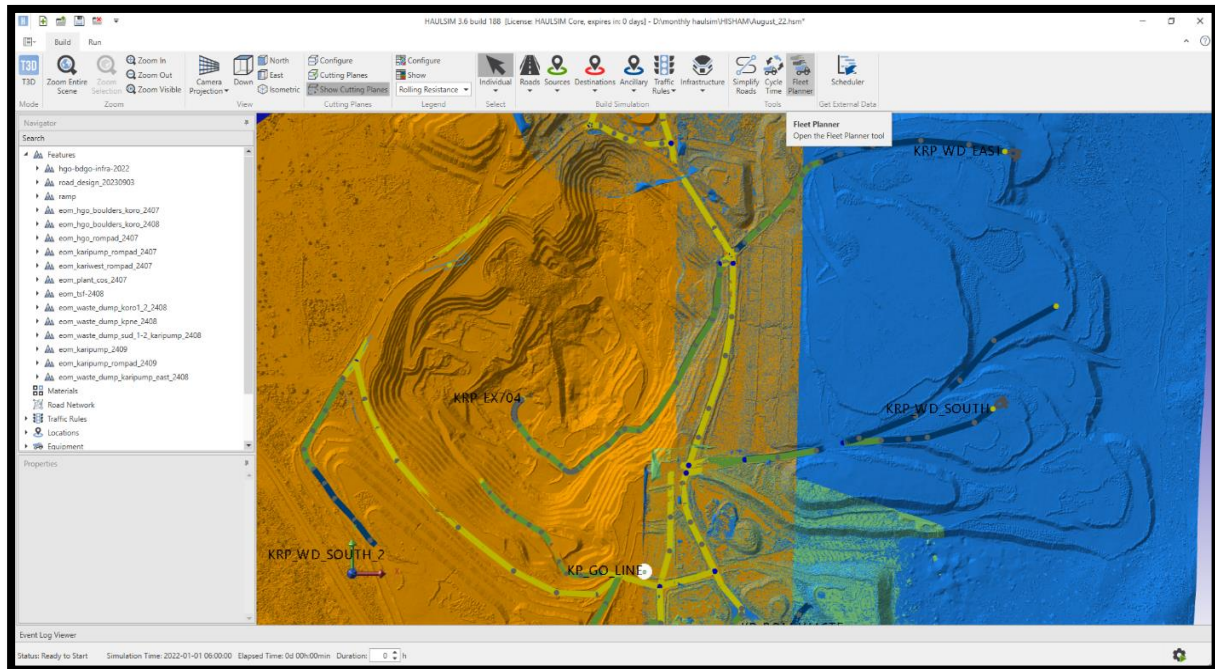


Figure 15 : Présentation de l'onglet « Fleet Planner » dans Haulsim

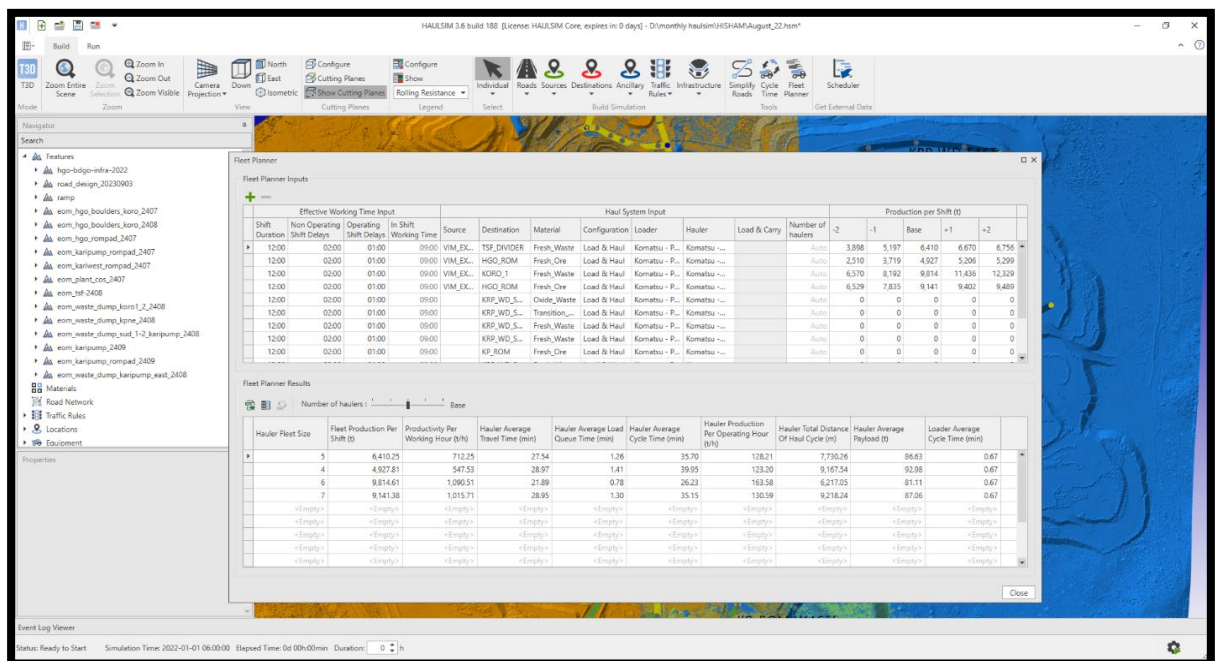


Figure 16 : Visualisation du rapport dans l'onglet "Fleet Planner" dans Haulsim

L'étape suivante est la mise à jour de la flotte où l'on peut visualiser la taille de la flotte ainsi que le temps de cycle recommandé par Haulsim.

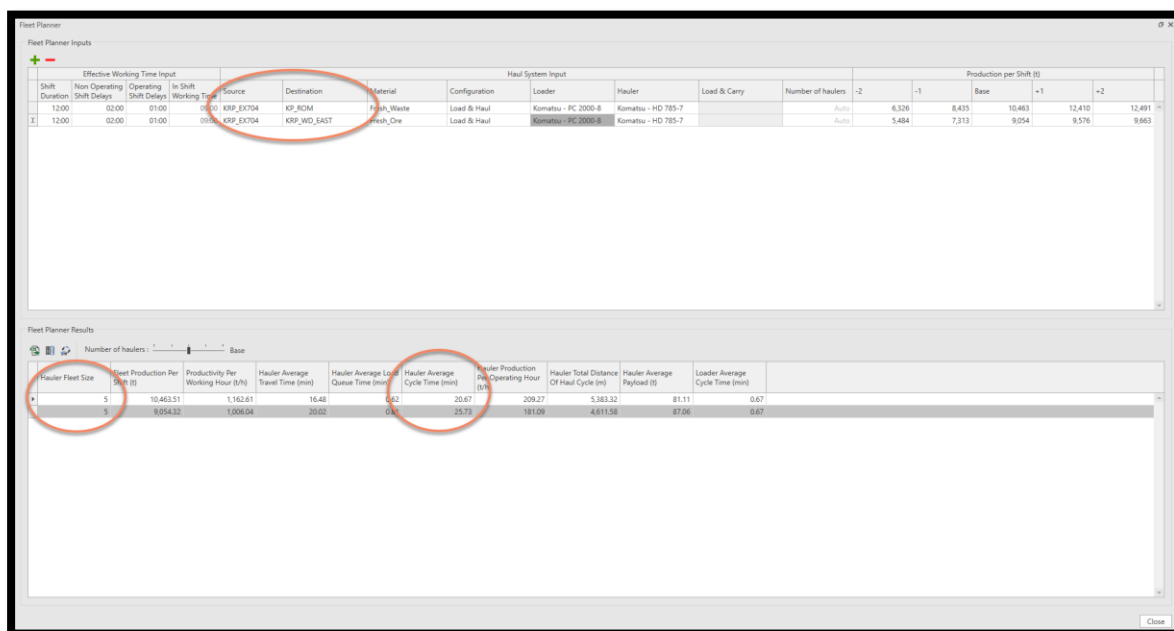


Figure 17 : Visualisation de la flotte et du temps de cycle théorique des camions dans le logiciel Haulsim

Enfin, la dernière étape consiste à extraire le rapport dans un fichier Excel. Pour cela, on clique sur l'icône Excel dans « Fleet Planner Results ».

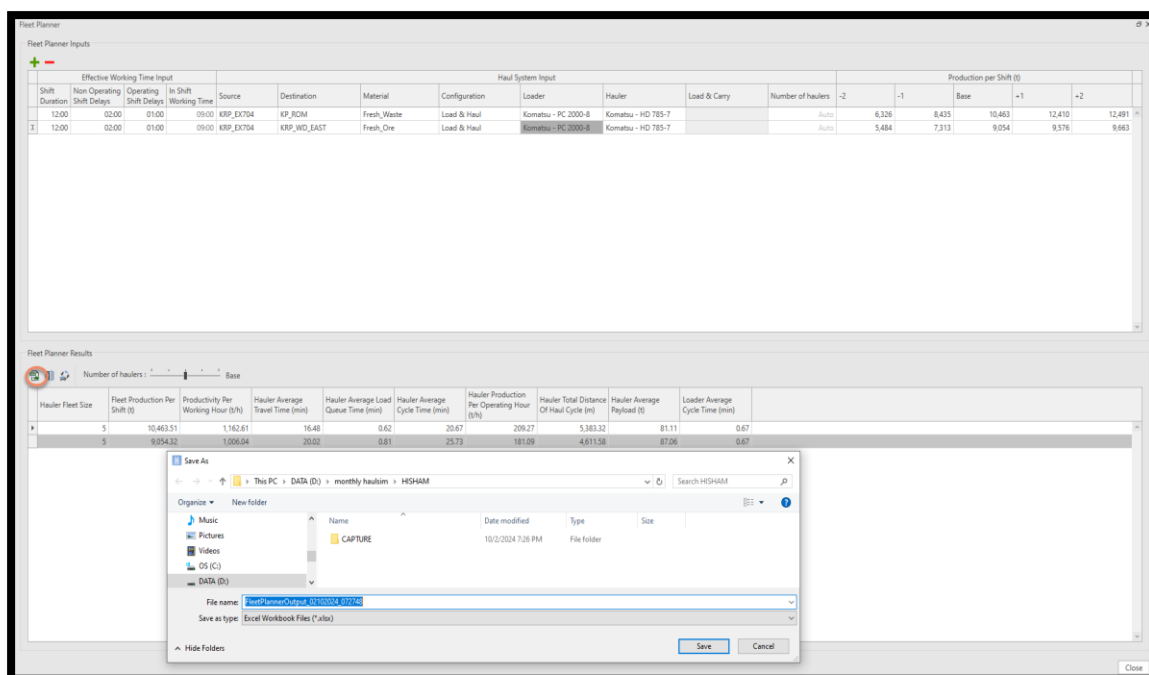


Figure 18 : Exportation des données sur EXCEL

Shift Duration	Non Operating	Operating Shift	In Shift Working	Source	Destination	Material	Configuration	Loader	Hauler	Lead & Carry	Number of hauls	Base	Total
12:00 - 02:00	02:00	01:00 - 09:00	09:00	KRP_EX704	KP_ROM	Fresh Ore	Load & Haul	Komatsu - PC 2000	Komatsu - HD 785-2	Auto	2	1	12,410
12:00 - 02:00	02:00	01:00 - 09:00	09:00	KRP_EX704	KRP_WD_EAST	Fresh Ore	Load & Haul	Komatsu - PC 2000	Komatsu - HD 785-2	Auto	2	1	12,410

Figure 19 : Présentation de la feuille EXCEL exportée

II.2.2.2. Détermination du temps de cycle théorique des pelles hydrauliques

Le calcul du temps de cycle d'une pelle hydraulique pour atteindre un objectif de productivité implique plusieurs étapes clés. Ce sont :

➤ La détermination de l'objectif de productivité (tonnes par heure)

L'objectif de productivité est généralement fixé en fonction des **besoins de production** du site minier et des **données historiques**.

Il représente la quantité de matériau que la pelle doit charger par heure. Cet objectif est donné en **tonnes par heure (t/h)**.

➤ La connaissance de la capacité du godet (tonnes par cycle)

Chaque pelle est équipée d'un godet avec une capacité spécifique qui indique le volume ou le poids maximal de matériau qu'elle peut déplacer en un seul cycle de chargement. Cette capacité est exprimée en **tonnes par cycle**.

➤ **La connaissance du taux de remplissage du godet (%)**

Le **taux de remplissage** représente l'efficacité avec laquelle le godet est rempli lors de chaque opération de chargement. Notons qu'un godet est rarement rempli à 100 % de sa capacité théorique, c'est pourquoi un facteur de remplissage est appliqué.

➤ **Le calcul de la quantité de matériau par cycle de chargement**

Une fois la capacité du godet et le taux de remplissage déterminés, on peut calculer la quantité de matériau déplacée à chaque cycle. La formule est la suivante :

$$\text{Matériau déplacé par cycle (tonne)} = \text{Capacité du godet (tonne)} \times \text{Taux de remplissage}$$

Équation 4 : Calcul de la quantité de matériau déplacée par cycle de chargement

➤ **La détermination du nombre de cycles nécessaires par heure**

Pour atteindre l'objectif de productivité, il faut déterminer combien de cycles de chargement sont nécessaires pour charger la quantité cible de matériau en une heure.

Le calcul est le suivant :

$$\text{Nombre de cycles par heure} = \frac{\text{Objectif de productivité}}{\text{Quantité de matériau déplacé par cycle}}$$

Équation 5 : Calcul du nombre de cycle par heure

➤ **Le calcul de l'objectif du temps de cycle (en secondes)**

Il se détermine en divisant le nombre de secondes dans une heure (3600 secondes) par le nombre de cycles requis par heure. La formule est la suivante :

$$\text{Temps de cycle} = \frac{3600}{\text{Nombre de cycles par heure}}$$

Équation 6 : Calcul de l'objectif théorique du temps de cycle pour une pelle

Ce temps de cycle suppose que la pelle effectue les opérations de chargement sans interruption entre les cycles, ce qui n'est pas réaliste.

Par conséquent, nous prenons également en compte le temps moyen total nécessaire aux camions pour manœuvrer et se positionner afin d'être chargés, ainsi que le temps d'attente moyen total des pelles entre deux chargements sur une (01) heure.

Ces délais sont ensuite soustraits du nombre de secondes dans une (01) heure pour obtenir le temps de cycle réel donné par l'équation suivante :

$$\text{Temps de cycle réel} = \frac{3600 - (T_{mm} + T_{am})}{\text{Nombre de cycles par heure}}$$

Équation 7 : Calcul de l'objectif réel du temps de cycle pour une pelle

T_{mm} : Temps de manœuvre moyen total sur une heure

T_{am} : Temps d'attente moyen de la pelle entre 2 chargements sur une heure

$$\text{Taux de remplissage du godet} = \frac{\text{objectif du nombre de godets par camion}}{\text{Nombre de godets par camion réalisé}} \times 100$$

Équation 8 : Calcul du taux de remplissage du godet

A partir de la capacité des Dump Trucks (DTs) et de celle du godet de la pelle et du taux de remplissage du godet acceptable, nous pouvons calculer le nombre maximal de cycles à ne pas dépasser pour chaque chargement. Cela nous permet également de déterminer la durée maximale nécessaire pour charger complètement un camion.

$$\text{Nombre de cycles par chargement} = \frac{\text{Capacité de la benne}}{\text{Capacité du godet} \times \text{Taux de remplissage acceptable}}$$

Équation 9 : Calcul du nombre de cycles par chargement

$$\text{Temps de chargement} = \text{Nombre de cycles par chargement} \times \text{Temps de cycle réel}$$

Équation 10 : Calcul du temps de chargement par DTs

II.3. Traitement des données

II.3.1 Calcul et analyse des indicateurs de performance

Dans notre étude, les principaux indicateurs de performance des engins incluent la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, le taux de saturation et la productivité.

La fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité des engins relèvent principalement du service de maintenance, qui doit s'assurer que les engins sont en bon état de marche et prêts à être utilisés à tout moment.

En revanche, le taux de saturation et la productivité des engins dépendent du département de production, qui est chargé d'améliorer continuellement le taux de saturation pour atteindre les objectifs de productivité.

II.3.1.1. Fiabilité et Maintenabilité

Les calculs de fiabilité et de maintenabilité sont donnés respectivement par le Mean Time Between Failure (MTBF) et le Mean Time To Repair (MTTR).

Selon Caterpillar, World Class Standards (2002), les valeurs de MTBF pour les équipements miniers doivent atteindre 80 heures pour un équipement neuf et 60 heures pour un équipement plus vieux. Cependant, le résultat des valeurs du MTTR désirées se situe entre 3 et 6 heures (Caterpillar, World Class Standards, 2002).

Ces mêmes valeurs sont considérées par les maintenanciers à la mine d'or de Houndé.

Le MTBF représente la durée moyenne entre deux défaillances successives d'un équipement ou d'un système. C'est un indicateur de la fiabilité et de la performance de l'équipement. La formule est la suivante :

$$\text{MTBF} = \frac{\text{TEMPS TOTAL DE FONCTIONNEMENT}}{\text{NOMBRE TOTAL DE DEFAILLANCES}}$$

Équation 11 : Calcul du Mean Time Between Failure (MTBF)

Temps total de fonctionnement : c'est la somme des périodes durant lesquelles l'équipement fonctionne correctement sans panne.

Nombre total de défaillances : c'est le nombre de pannes survenues pour lesquelles des réparations ont été effectuées.

Le MTTR est le temps moyen nécessaire pour réparer un équipement ou un système après une panne. Il indique la maintenabilité de l'équipement et se calcule comme suit :

$$\text{MTTR} = \frac{\text{TEMPS TOTAL DE REPARATIONS}}{\text{NOMBRE TOTAL DE DEFAILLANCES}}$$

Équation 12 : Calcul du Mean Time To Repair (MTTR)

Temps total de réparation : somme des durées nécessaires pour réparer l'équipement à chaque panne.

II.3.1.2. Disponibilité

Elle se définit comme l'état d'un système (sous les aspects combinés de sa fiabilité, sa maintenabilité et son support logistique) lorsqu'il est capable d'accomplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu, dans des conditions d'utilisation, a un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné. (**Vachon, 1997**). Il existe différents types de disponibilité, mais dans la section production, nous nous concentrerons sur la disponibilité physique, car elle est la plus représentative pour les différentes études que nous menons.

Mathématiquement, c'est une mesure de la proportion du temps total sans les périodes d'arrêts par rapport au temps pendant lequel un équipement est opérationnel et prêt à être utilisé. Elle est définie par la formule :

$$\text{Disponibilité (\%)} = \frac{\text{Temps total} - \text{Temps d'arrêt}}{\text{Temps total}} \times 100$$

Équation 13 : Calcul de la Disponibilité

Temps total : le temps total prévu pour le fonctionnement de l'équipement (temps de PM exclut).

Temps d'arrêt : le temps pendant lequel l'équipement est à l'arrêt en raison de toute interruption liée à une maintenance corrective ou d'une extension du temps de PM.

II.3.1.3. Taux de saturation

Mathématiquement, le taux de saturation d'un équipement de production se réfère au pourcentage de temps pendant lequel l'engin est réellement en opération. En d'autres termes, c'est le ratio entre le temps durant lequel l'engin est en activité de production et le temps total pendant lequel il est disponible et prêt à fonctionner. Ce ratio est exprimé en pourcentage à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Taux de saturation (\%)} = \frac{\text{Temps effectif de travail}}{\text{Temps de disponibilité}} \times 100$$

Équation 14 : Calcul du Taux de saturation

Temps effectif de travail : C'est la période durant laquelle l'équipement effectue une opération de production.

Temps de disponibilité : Temps pendant lequel la pelle est disponible

II.3.1.4. Productivité

La productivité est la quantité de matériaux déplacée par unité de temps. Elle est définie par la formule suivante :

$$\text{Productivité (T/H)} = \frac{\text{Production}}{\text{Temps total}}$$

Équation 15 : Calcul de la productivité

Production : C'est la quantité de matériaux extrait de la fosse par la pelle et transporté par les DTs. Elle se calcule de la manière suivante :

$$\text{Production (T)} = \text{Capacité du camion de transport} \times \text{Nombre de chargement}$$

Équation 16 : Calcul de la Production

II.3.2 Détermination des facteurs influençant les indicateurs de performance

Nous identifierons les causes principales des problèmes rencontrés par chaque excavatrice en utilisant un diagramme de Pareto réalisé sur **EXCEL 2016**.

Le diagramme de Pareto est un histogramme où les causes de survenance d'un problème sont classées de la gauche vers la droite, par ordre décroissant des fréquences d'occurrence. Sur le même graphe, une courbe correspondant aux fréquences cumulées est tracée.

L'interprétation du diagramme obéit à la loi de Pareto également connue sous le nom de loi des 20/80. Elle stipule que 20% des causes génèrent 80% des effets. Il suffit donc de travailler sur les 20% de causes pour influencer fortement le phénomène. **(Fakounde,2019)**.

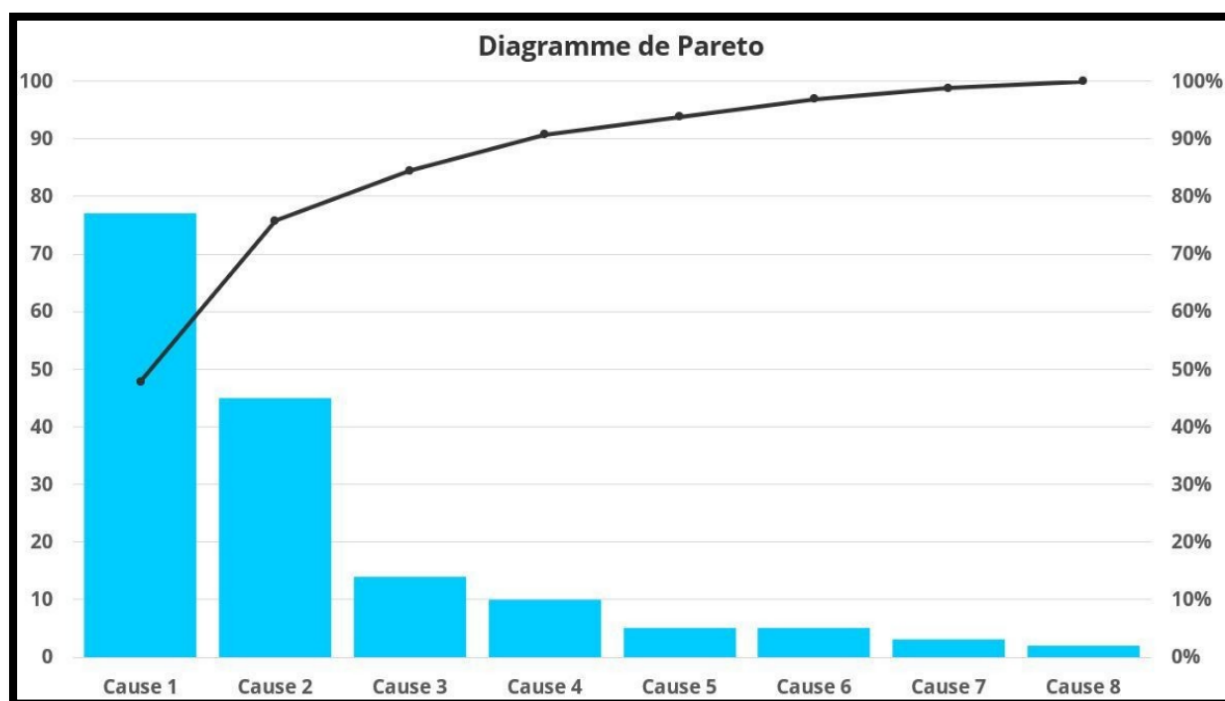


Figure 20 : Exemple d'un diagramme de Pareto

II.3.3 Etat des lieux des rampes

L'état des lieux des rampes est réalisé en utilisant le logiciel GEOVIA Surpac 6.6.2 pour évaluer les principales caractéristiques des rampes dans les fosses Kari Pump et Vindaloo Main. Cette évaluation porte sur des aspects tels que la largeur moyenne, la forme et la pente moyenne des rampes.

La largeur et la pente moyenne sont mesurées pour s'assurer qu'elles sont adaptées au passage des équipements miniers et qu'elles respectent les normes de sécurité.

Les largeurs sécuritaires de la rampe se déterminent selon les équations suivantes :

$$LR = 3.5 * LGE$$

Équation 17 : Calcul de la largeur sécuritaire d'une rampe "DOUBLE WAY"

LR : Largeur Rampe

LGE : Largeur du plus grand équipement

La pente sécuritaire quant à elle est fixée à 10% au vu de la forme et de la robustesse des engins miniers.

Pour déterminer la largeur et la pente moyenne de la rampe avec SURPAC, les étapes sont les suivantes :

- **Afficher les surfaces topographiques** : charger les différentes surfaces topographiques, incluant les fosses et les rampes.
- **Digitaliser les rampes** : digitaliser les rampes et enregistrez-les au format string (.str).
- **Mesurer la largeur** : aller dans l'onglet "Inquire" et sélectionner "Bearing and Distance Between 2 Points".
- **Sélectionner les points** : choisir deux points entre lesquels nous souhaitons mesurer la largeur de la rampe.
- **Noter la largeur et la pente** : enregistrer les mesures de la largeur et de la pente obtenues.
- **Répéter la mesure** : répéter cette opération sur l'ensemble de la rampe, en mesurant au moins deux fois par tronçon.

À la fin du processus, nous ferons la moyenne des différentes pentes obtenues pour la valeur moyenne finale.

Pour les largeurs, nous allons repérer les zones étroites, noter leurs largeurs et évaluer ce qu'elles mesurent en moyenne.

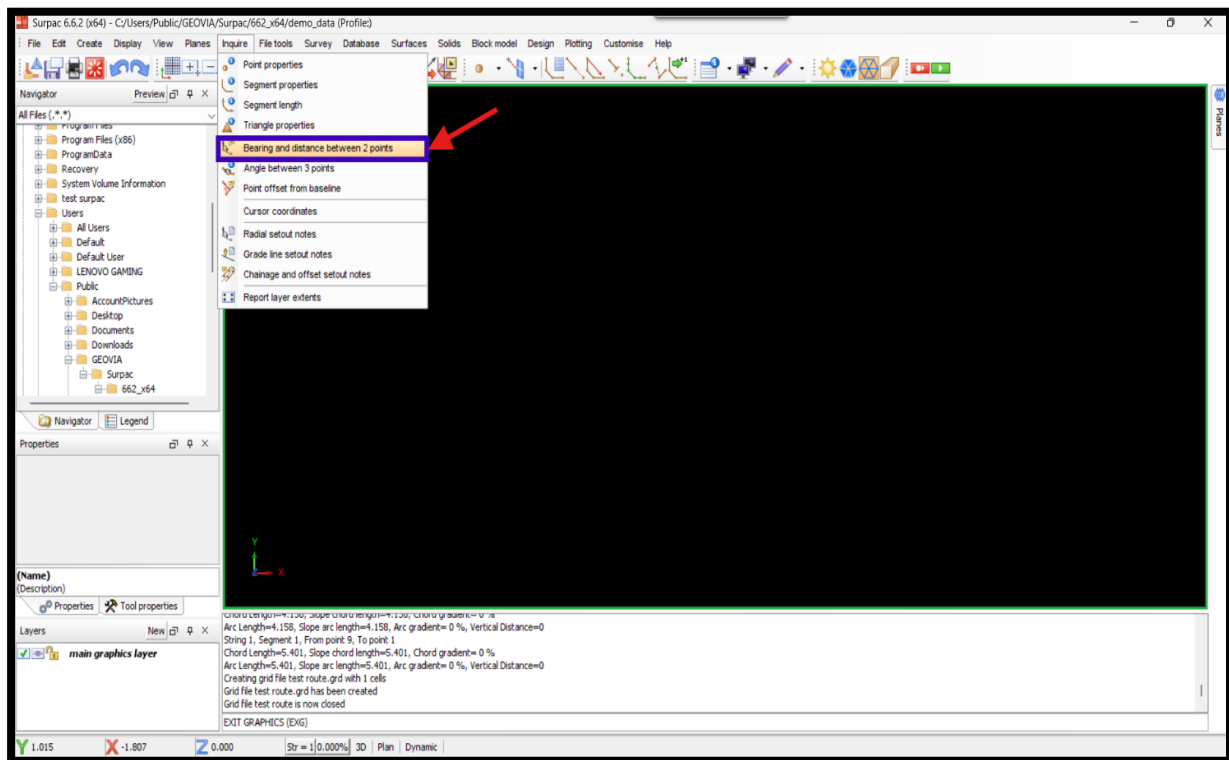


Figure 21 : Fonction pour la détermination de la largeur et de la pente des rampes dans GEOVIA SURPAC 6.6.2

La forme des rampes est analysée pour fluidifier la circulation afin pour diminuer les temps d'attente des pelles dus aux longs temps de cycle des camions et réduire les risques d'accidents.

Pour ce faire, dans le logiciel nous effectuons successivement les tâches suivantes :

- Afficher les différentes surfaces topographiques (fosses, rampes).
- Digitaliser les rampes et les enregistrer sous l'extension .str.
- Cacher les surfaces topographiques et afficher les différents strings enregistrés.

NB : Pour digitaliser :

- ✚ Nous affichons la barre d'outils « digitise ».
- ✚ Nous sélectionnons l'outil « Create new points using the mouse ».
- ✚ Nous cliquons sur chaque point en suivant les bordures des rampes.

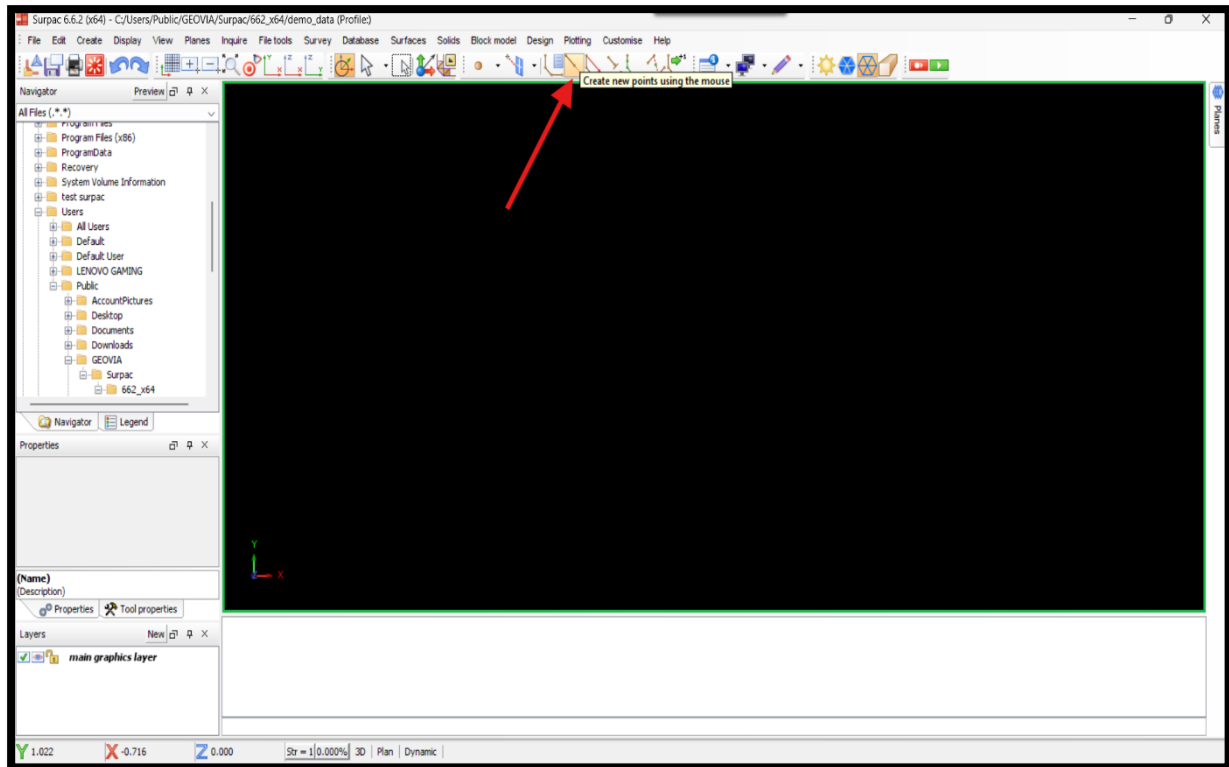


Figure 22 : Fonction pour la détermination de la forme des rampes dans GEOVIA SURPAC 6.6.2

Ces données permettent une analyse approfondie des rampes, facilitant ainsi l'amélioration des opérations de production et la conformité aux normes techniques et sécuritaires.

II.3.4 Evaluation des pertes

Les pertes correspondent à tous les écarts négatifs observés au cours de notre étude. Ces écarts peuvent être quantifiés en termes de matériaux à déplacer et de coûts. Pour se faire, nous nous focaliserons sur les pelles, car le manque à gagner provient de ces dernières. Dans notre cas, nous considérerons les écarts en termes de quantité de matériaux à déplacer.

Les pertes engendrées par les temps d'observation et les temps de cycle élevés de la pelle sont calculées par la formule suivante :

$$\text{Pertes (T)} = T_m \times V_h \times P_{rd}$$

Équation 18 : Calcul des pertes dues aux temps de cycle

Tm (Heures) : Temps moyen du surplus de temps mis par la pelle pour charger un camion par heure.

Vh : Nombre d'heures pendant lesquelles la pelle travaille effectivement.

Prd (Tonne/Heure) : Objectif de Productivité.

Quant aux pertes engendrées par les retards opérationnels, la formule est la suivante :

$$\text{Pertes (T)} = V_{hr} \times Prd$$

Équation 19 : Calcul des pertes associées aux retards opérationnels

Vhr (Heures) : Volume horaire total lié aux retards

Prd (Tonne/Heure) : Objectif de Productivité

II.3.5 Mise en place d'un système d'amélioration et apport du système

Il s'agit ici de la mise en place de solutions visant à résoudre les problèmes identifiés lors de la phase d'analyse. Ces solutions doivent s'appuyer sur des données et des faits solides issus d'une analyse des résultats précédemment obtenus. Cela inclut l'étude du temps de cycle des pelles, l'identification des paramètres influençant le processus de chargement et de transport ainsi que l'analyse de l'état des rampes.

Ces initiatives ont conduit à l'élaboration d'une grille pour prévoir l'allocation des camions, prenant en compte la distance entre la fosse et les différentes déverses, tout en répondant à l'objectif de productivité des pelles.

Le nombre de camions par pelle est donné par la formule ci-dessous :

$$Nc = \frac{Tc}{T_{cp}} + 1$$

Équation 20 : Calcul du nombre de camion optimal par pelles

T_{cp} : Temps de chargement d'un camion par la pelle

N_c : Nombre de camions par pelle

T_c : Temps de cycle du camion

De cette équation nous obtenons l'équation suivante ne prenant en compte que 2 variables que sont la distance **d**, de la fosse aux lieux de déverses et la productivité **Prod**, réalisée ou à atteindre.

$$N_c = 1 + 1 + 10^{-5} (82.10d + 93.89) \text{ Prod}$$

Équation 21 : Equation de mise en place de la grille de productivité

Nous présentons ci-dessous la démarche de mise en place de l'équation.

On a :

$$T_c = AC + RC + V + RV + AT \text{ (cf. Equation 3)}$$

V_v : Vitesse à Vide moyenne mesurée

V_c : Vitesse en charge moyenne mesurée

$$AC = \frac{\text{Capacité du camion}}{\text{prod de la pelle}} ; \text{ Capacité du camion} = 100 \text{ tonnes}$$

$$RC = \frac{d}{V_c} \text{ et } RV = \frac{d}{V_v} \text{ donc } AC + RC = \frac{d * (V_c + V_v)}{V_c * V_v}$$

$$V = 38 \text{ s soit } 10,56. 10^{-3} \text{ h}$$

$$AT = 5 \text{ min soit } 83,33.10^{-3} \text{ h}$$

$$V_c = \frac{14 + 28}{2} = 21 \text{ km/h}$$

$$V_v = \frac{24 + 34}{2} = 29 \text{ Km/h}$$

$$N_c = \frac{\frac{100}{\text{Prod}} + 82,10.10^{-3} X (82,10 d) + 10,56.10^{-3} + 83,33.10^{-3}}{\frac{100}{\text{Prod}}} + 1$$

D'où l'équation 21.



Après l'élaboration de la grille, nous évaluerons la quantité de matériaux déplacée en plus après l'application de la méthode.

$$\text{Gains (T)} = V_{\text{hr}} \times \text{Prd}$$

Équation 22 : Evaluation des gains potentiels de la grille

V_{hr} (Heures) : Volume horaire lié aux temps d'attentes gagnés

Prd (Tonne/Heure) : Productivité Réalisée



CHAPITRE III : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET RECOMMANDATIONS

I. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Dans ce paragraphe, nous présenterons les résultats que nous avons obtenus tout au long de notre étude.

I.1. Indicateurs de performance et détermination des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 des facteurs qui les influence

Les résultats portent sur les pelles hydrauliques KOMATSU PC2000. Nous allons présenter ci-après les résultats obtenus sur les indicateurs de performance durant notre période d'étude. Nous avons pris en compte la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, le taux de saturation et la productivité.

I.1.1. Fiabilité et Maintenabilité

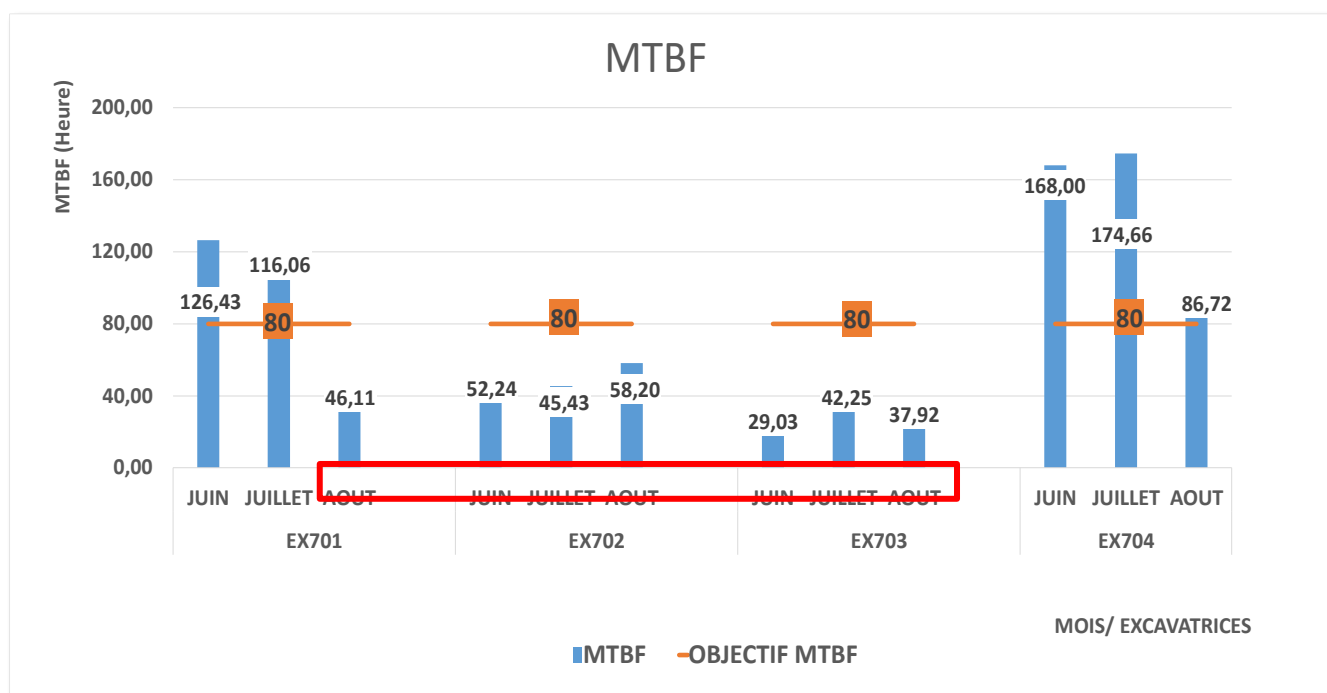


Figure 23 : Fiabilité des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 sur la période d'étude

La représentation graphique montre le temps moyen entre les pannes (MTBF) pour les excavatrices EX701, EX702, EX703 et EX704 sur la période d'étude. Elle montre que EX701 a dépassé l'objectif de MTBF fixé (80 heures) en juin et juillet avec respectivement 126,43 et 116,06 heures, mais chute en août à 46,11 heures, bien en dessous de l'objectif.

EX702 n'atteint jamais l'objectif durant cette période, avec un MTBF variant entre 45,43 et 58,20 heures, indiquant une fiabilité limitée.

De son côté, EX703 affiche les pires performances, avec des valeurs nettement inférieures à l'objectif, avec un maximum 42,25 heures en juillet, ce qui révèle une faible fiabilité et des pannes fréquentes.

À l'inverse, EX704 se distingue par des performances impressionnantes, dépassant de loin l'objectif avec un MTBF de 168,00 heures et 174,66 heures respectivement en juin et juillet, avant de se stabiliser à 86,72 heures en août, toujours au-dessus de la cible. Ce dernier est donc l'équipement le plus fiable de la période.

Pour sa maintenabilité, nous avons le graphique suivant :

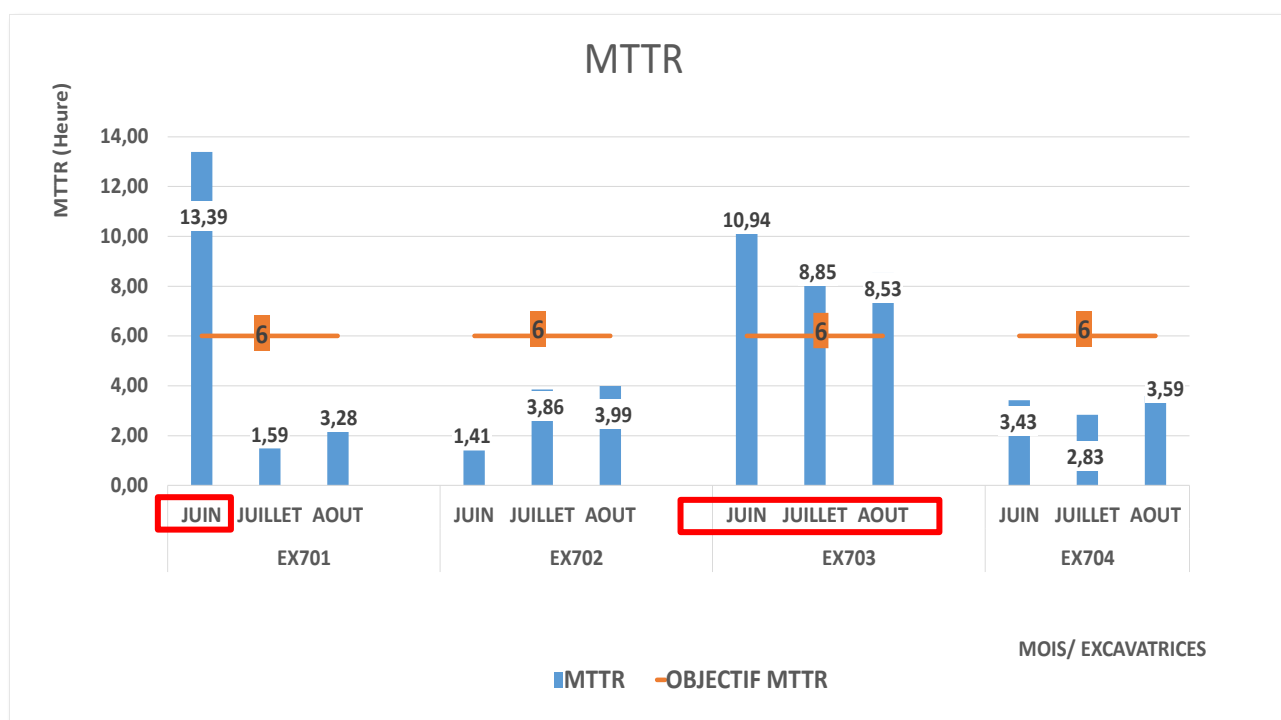


Figure 24 : Maintenabilité des pelles hydrauliques KOMATSU PC 2000 sur la période d'étude (Juin 2024 – Août 2024)

Le temps de réparation moyen (MTTR) des excavatrices EX701, EX702, EX703 et EX704 pour les mois de juin, juillet et août est présenté sur le graphique, en comparaison avec l'objectif fixé de 6 heures.

En juin, EX701 présente un MTTR très élevé (13,39 heures), mais enregistre une amélioration notable en juillet et août, avec des valeurs nettement inférieures à l'objectif (1,59 et 3,28 heures respectivement). Le MTTR élevé en juin s'explique par un problème de godet qui a duré plus d'une semaine.

Pendant toute la période, EX702 reste toujours en dessous l'objectif, avec des délais de réparation variant de 1,41 à 3,99 heures.

En ce qui concerne EX703, elle dépasse régulièrement l'objectif, avec des MTTR de 10,94, 8,85 et 8,53 heures pour les mois de juin, juillet et août, respectivement, ce qui suscite des problèmes de réparation plus longs.

Enfin, les résultats d'EX704 sont satisfaisants, toujours en dessous de l'objectif, avec des valeurs variant de 2,83 à 3,59 heures. EX701, EX702 et EX704 ont un système de maintenance assez bon par rapport à l'objectif, tandis que EX703 requiert une attention particulière afin de diminuer ses temps de réparation.

En combinant les résultats de fiabilité et de maintenabilité, on constate que, pour l'excavatrice EX702, les réparations sont effectuées rapidement, mais elles ne sont pas efficaces, car le MTBF reste faible tout au long de la période. Un constat similaire est fait pour l'excavatrice EX701, notamment au mois d'août, où son MTBF est également bas malgré des réparations rapides. En ce qui concerne l'EX703, elle présente des temps de réparation longs et un MTBF faible, ce qui démontre l'inefficacité des maintenances effectuées sur cette machine. Par contre, l'EX704 ne présente aucun problème notable. En la comparant aux autres excavatrices, elle se révèle être la plus performante, probablement en raison de son état plus récent, ce qui lui confère une meilleure fiabilité et une bonne maintenabilité.

I.1.2. Disponibilité



Figure 25 : Disponibilité des PC 2000 sur la période d'étude

En observant le graphique, on voit que l'équipement EX701 montre une amélioration, passant de 70 % de disponibilité en juin à 94 % en juillet, mais redescend à 87 % en août.

EX702, après une bonne disponibilité en juin, a connu une baisse en juillet et août (85 % et 86 %), signe d'une augmentation des pannes. Ce qui confirme nos résultats de fiabilité et de maintenabilité.

EX703 est la plus problématique, avec des disponibilités faibles et inférieures aux objectifs sur toute la période. Des mesures correctives importantes sont nécessaires pour cet équipement.

EX704, quant à elle, se distingue par sa stabilité, avec une disponibilité régulière de 93 % à 94 %, probablement en raison de son statut d'équipement, le plus récent comme indiqué dans le point précédent.

Les résultats de la disponibilité des équipements révèlent des divergences importantes en général. Tandis que certains, comme EX702 et surtout EX703, nécessitent des actions correctives pour remédier leurs disponibilités peu satisfaisantes, EX704 se démarque par sa solidité.

On peut donc dire qu'il y a la nécessité d'améliorer le management des réparations des engins afin de garantir une accessibilité permanente et acceptable des équipements tout au long de l'année.

Les Faibles disponibilités des pelles EX701, EX702 et EX703 sur un (01) ou plusieurs mois sont dues à un ensemble de pannes. En effet, elles ont enregistré respectivement sur la période d'étude 299.3 heures, 136.4 heures, 557.7 heures de pannes. Pour connaître les pannes qui ont créées le plus d'indisponibilité afin de se focaliser sur ces dernières et les éviter, un diagramme de Pareto a été réalisé pour chaque pelle.

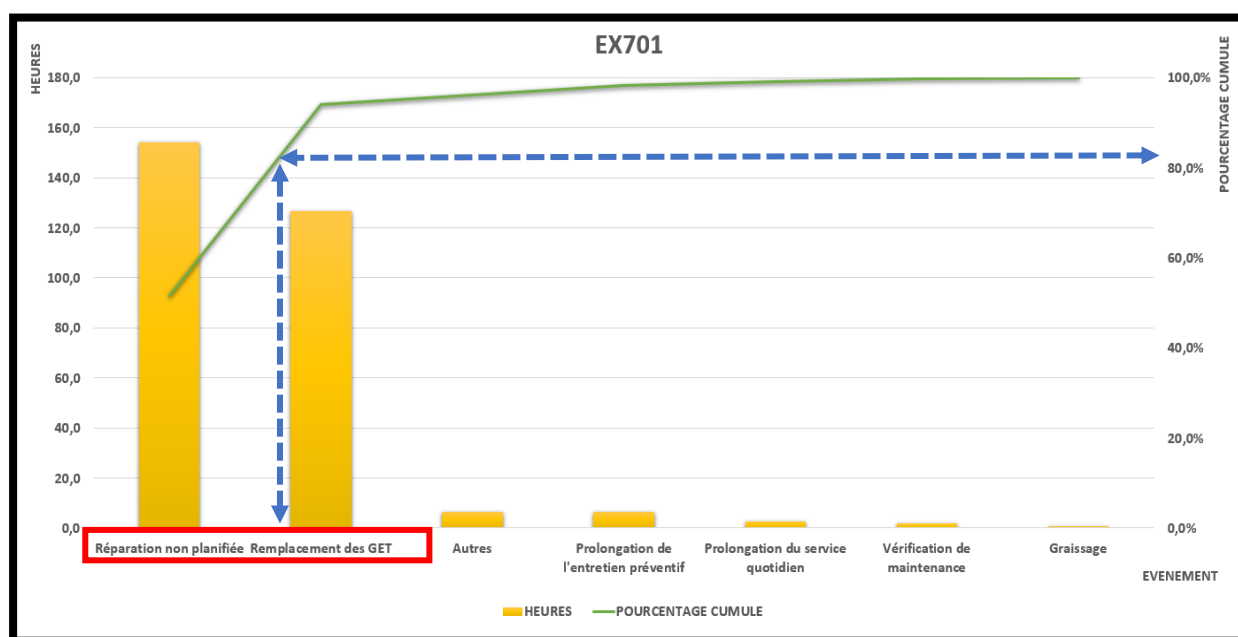


Figure 26 : Répartition des pannes de la EX701

En observant le diagramme, on voit que les réparations non planifiées et le remplacement des dents du godet ou des chenilles de la pelle (**GET**) ont été à 80% responsables de l'indisponibilité de la pelle sur la période d'étude. Ainsi, la résolution de ces deux problèmes pourra améliorer considérablement la disponibilité de celle-ci. Le reste des pannes a été moins impactant que les deux autres. En effet, les entretiens préventifs, la prolongation de l'entretien préventif, la prolongation du service quotidien, la vérification de la maintenance pour codes, le graissage et autres n'ont été qu'à 20% responsables de l'indisponibilité de la pelle.

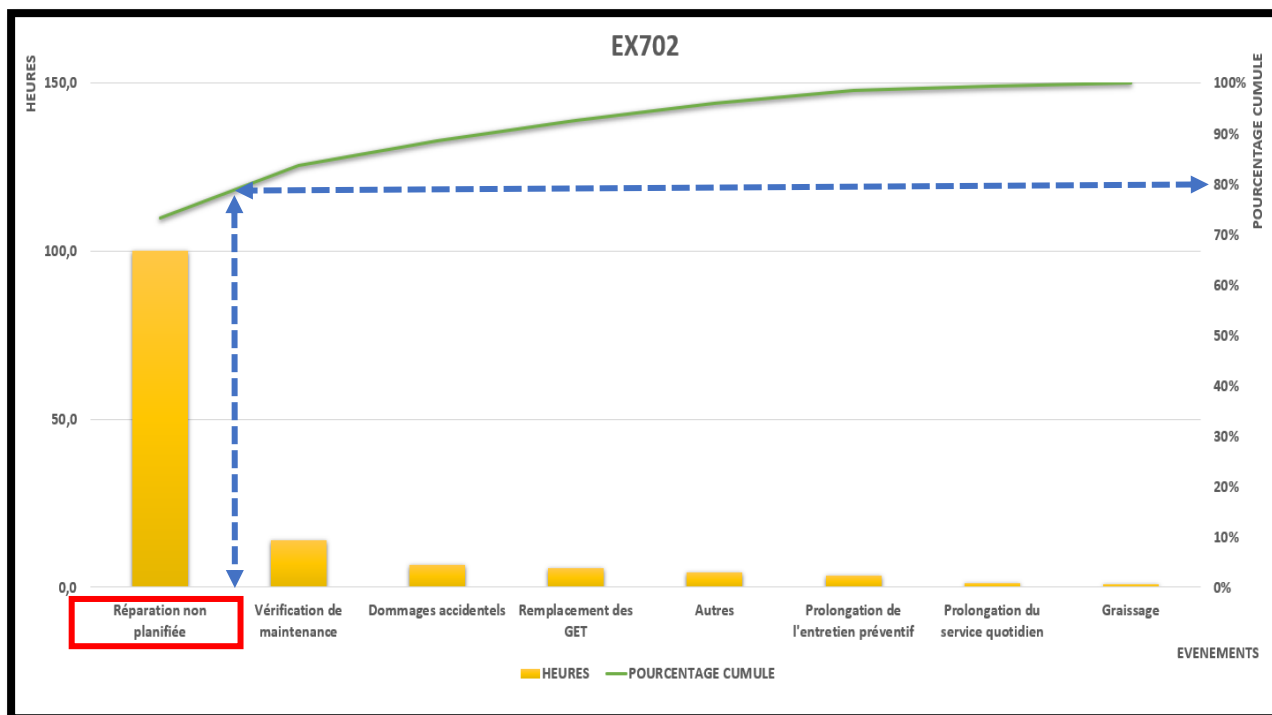


Figure 27 : Répartition des pannes de la EX702

Le graphique nous montre que seulement 20 % des pannes, à savoir les réparations non planifiées, ont été responsables de 80 % de l'indisponibilité de l'excavatrice EX702 au cours de la période d'étude. Outre cette cause de l'indisponibilité, d'autres facteurs mineurs ont également été identifiés, à savoir la prolongation de l'entretien préventif, l'extension du service quotidien, la vérification de la maintenance pour codes, les dommages accidentels, le remplacement des dents du godet ou des chenilles et le graissage.

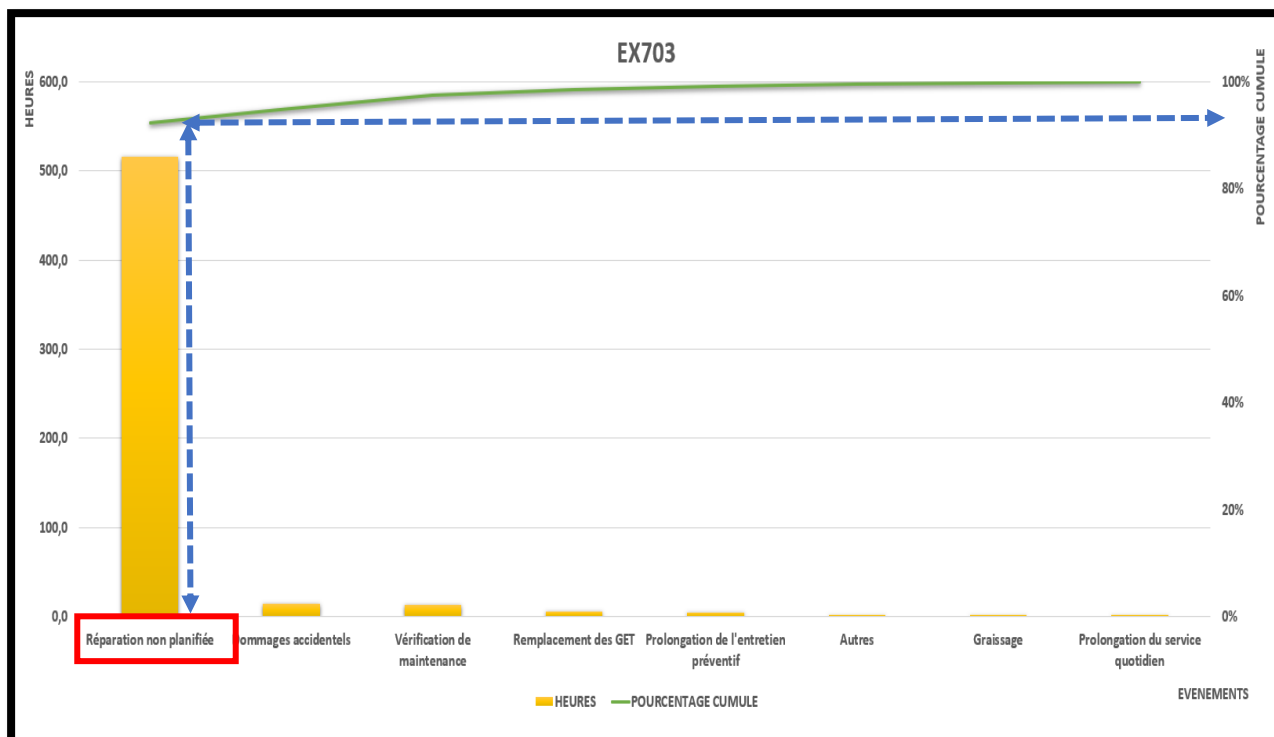


Figure 28 : Répartition des pannes de la EX703

L'excavatrice EX703 est la plus problématique avec le nombre d'heures de pannes le plus élevé, comme il a été souligné lors de l'analyse de la disponibilité de celle-ci.

Le graphique montre que plus de 80 % de l'indisponibilité de l'excavatrice est attribuable aux réparations non planifiées qui représentent moins de 20% des pannes enregistrées sur la période d'étude. De ce constat, on peut dire que le temps moyen entre les différentes pannes est très faible, ce qui indique que la pelle n'est pas fiable. Cette constatation nous permet aussi de confirmer nos résultats de fiabilité présentés plus haut. Les 80% des pannes restantes sont quant à elles considérées comme mineures et n'ont que 20% d'impact sur le temps d'indisponibilité.

I.1.3. Taux de saturation

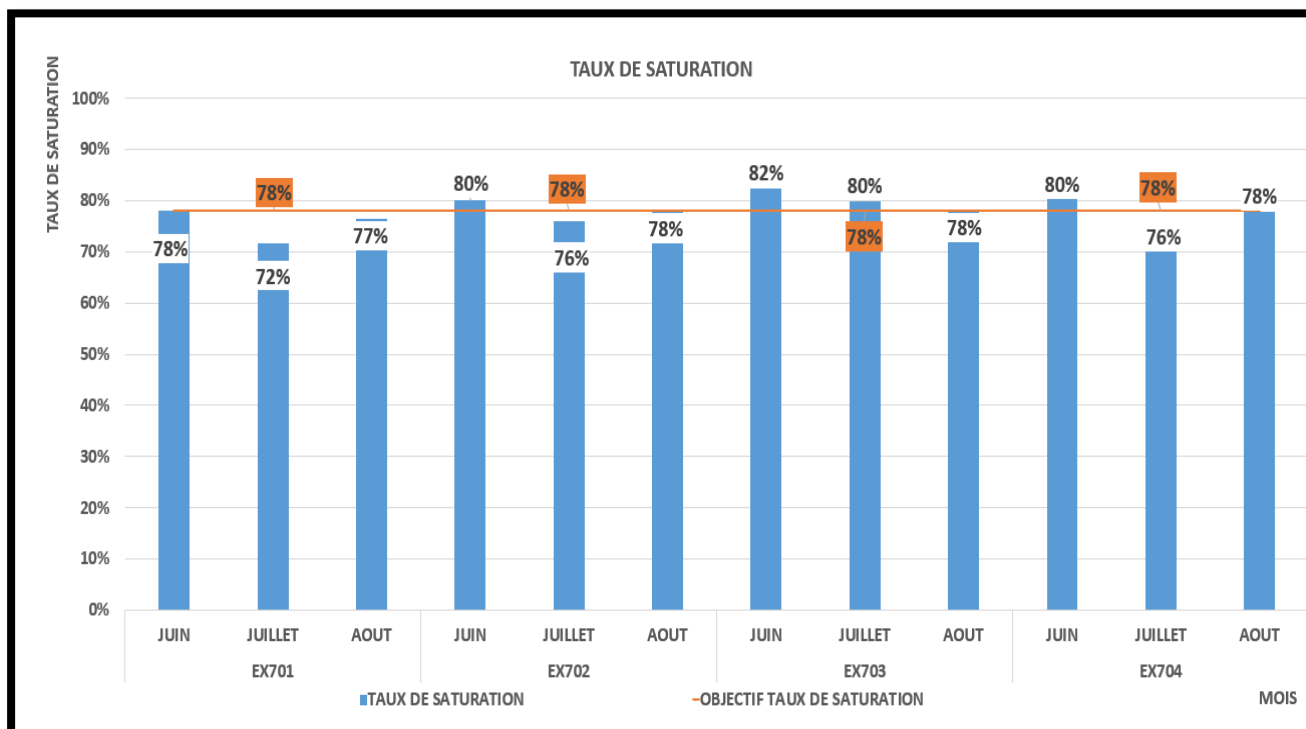


Figure 29 : Taux de saturation des PC 2000 sur la période d'étude

Les excavatrices affichent un taux de saturation variable. En effet, elles atteignent parfois l'objectif fixé, mais des écarts persistent, mettant en évidence des points à améliorer pour maintenir un niveau d'utilisation stable et constant au-dessus ou au niveau de la cible. Afin de garantir que le taux de saturation reste bon, il est important de cibler les facteurs qui le limitent. De ce fait, sur la période d'étude, nous avons enregistré respectivement pour les pelles EX701, EX702, EX703 et EX704 les heures de standby et de delay suivantes : 183,87 heures, 158,8 heures, 147,12 heures et 165,83 heures.

Pour connaître les événements qui influencent le plus le taux de saturation, la mise en place d'un diagramme de Pareto pour chaque pelle a été nécessaire.

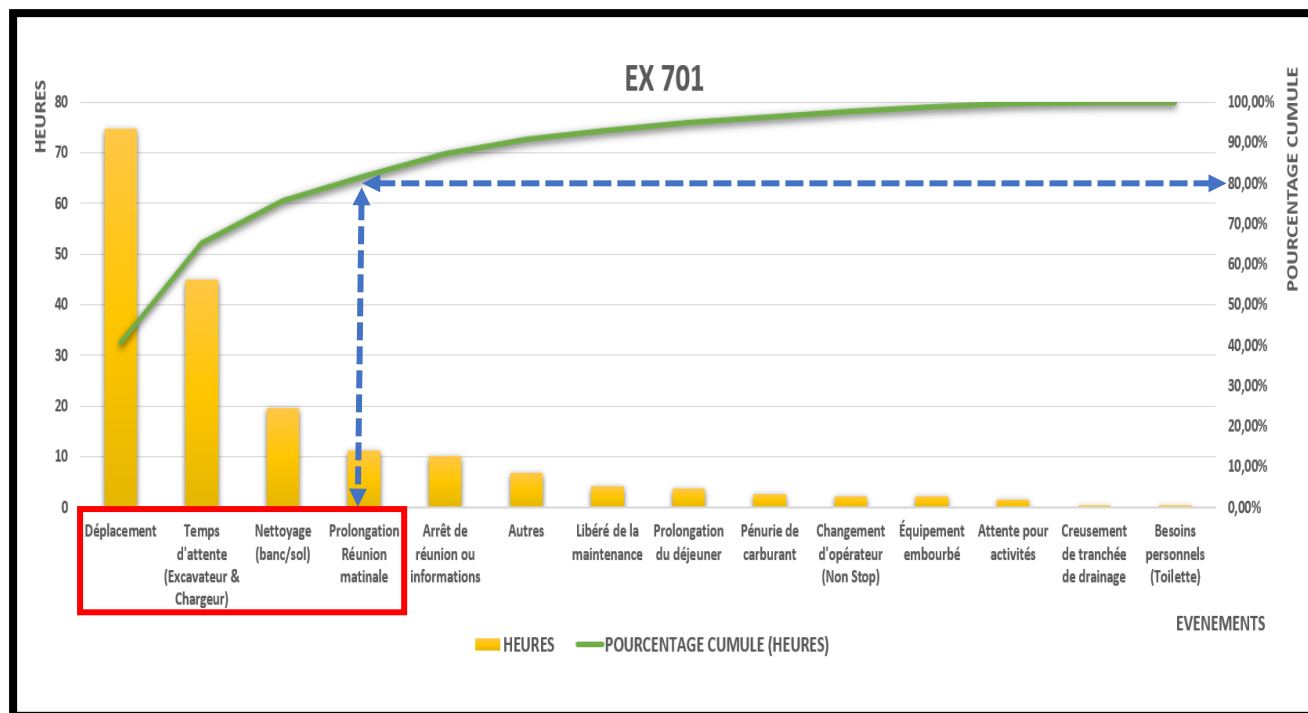


Figure 30 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour la pelle EX701

Le diagramme de Pareto pour l'excavatrice EX701 présente les principales raisons des arrêts de l'activité de production en heures cumulées pendant notre période d'étude. Ce sont entre autres les déplacements avec environ 75 heures, les temps d'attente et les nettoyages suivent avec environ 45 et 20 heures respectivement. En plus de cela, il y a des facteurs tels que la prolongation des réunions matinales, les arrêts pour réunions ou informations et autres, allant de 05 à 10 heures. Ces résultats sont en accord avec le principe de Pareto, selon lequel 20 % des causes sont responsables de 80 % des effets.

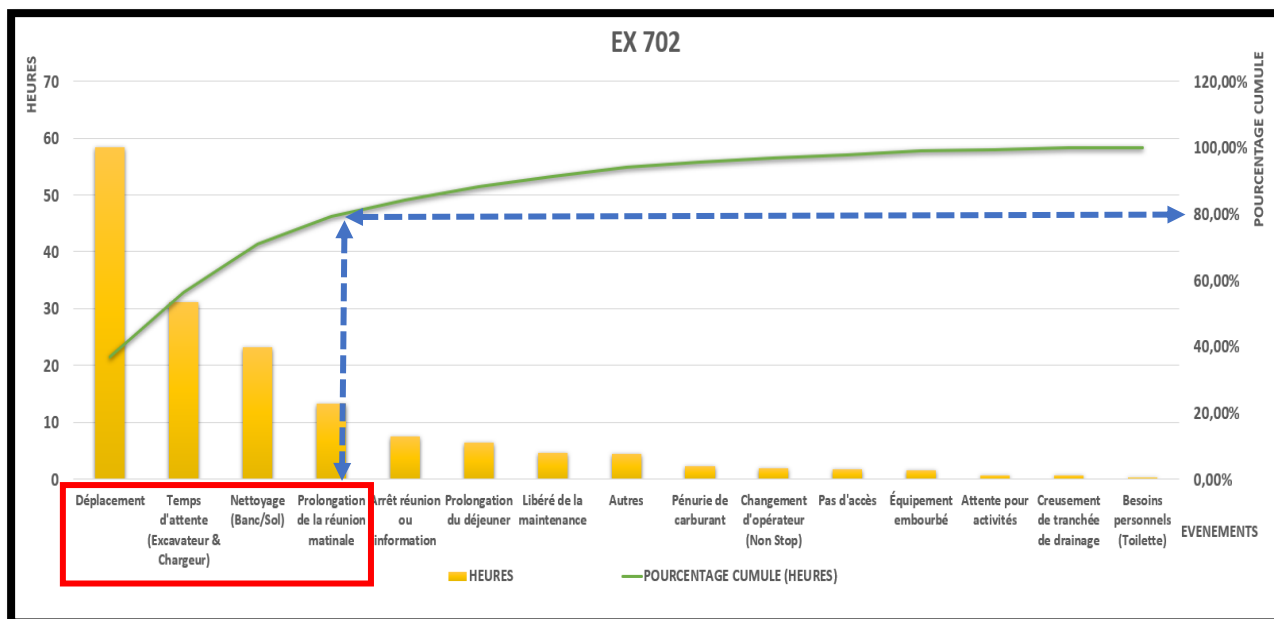


Figure 31 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour pelle EX702

En observant le graphe, on voit que les arrêts de la **EX702** sont majoritairement dus aux déplacements, aux temps d'attente, aux nettoyages et aux prolongations des réunions matinales. Ces arrêts comptent respectivement environ 60, 30, 25 et 15 heures. Les autres causes sont dites mineures, car elles ne sont responsables qu'à 20% des Standby et des Delay.

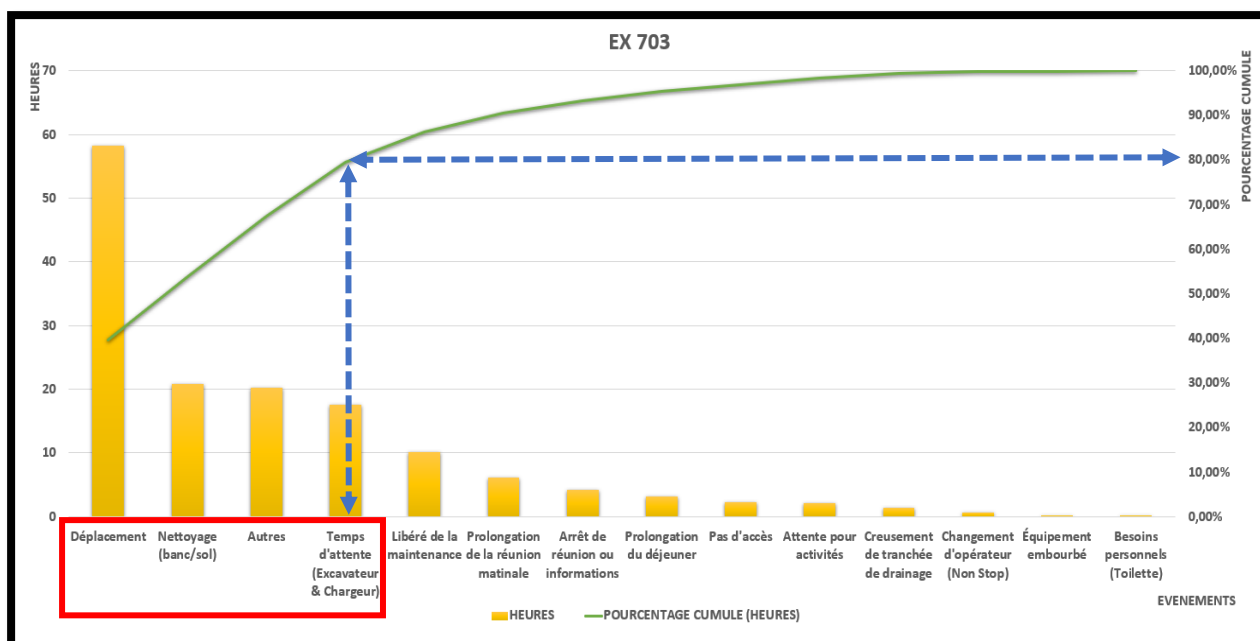


Figure 32 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour pelle EX703

En observant le diagramme, on voit que les principales causes de temps d'inactivité pour l'EX703 sont les déplacements avec 60 heures, les nettoyages et les temps d'attente, avec chacune 20 heures environ. Les prolongations de réunions matinales, les prolongations de déjeuner et d'autres interruptions mineures contribuent également aux arrêts, mais dans une moindre mesure.

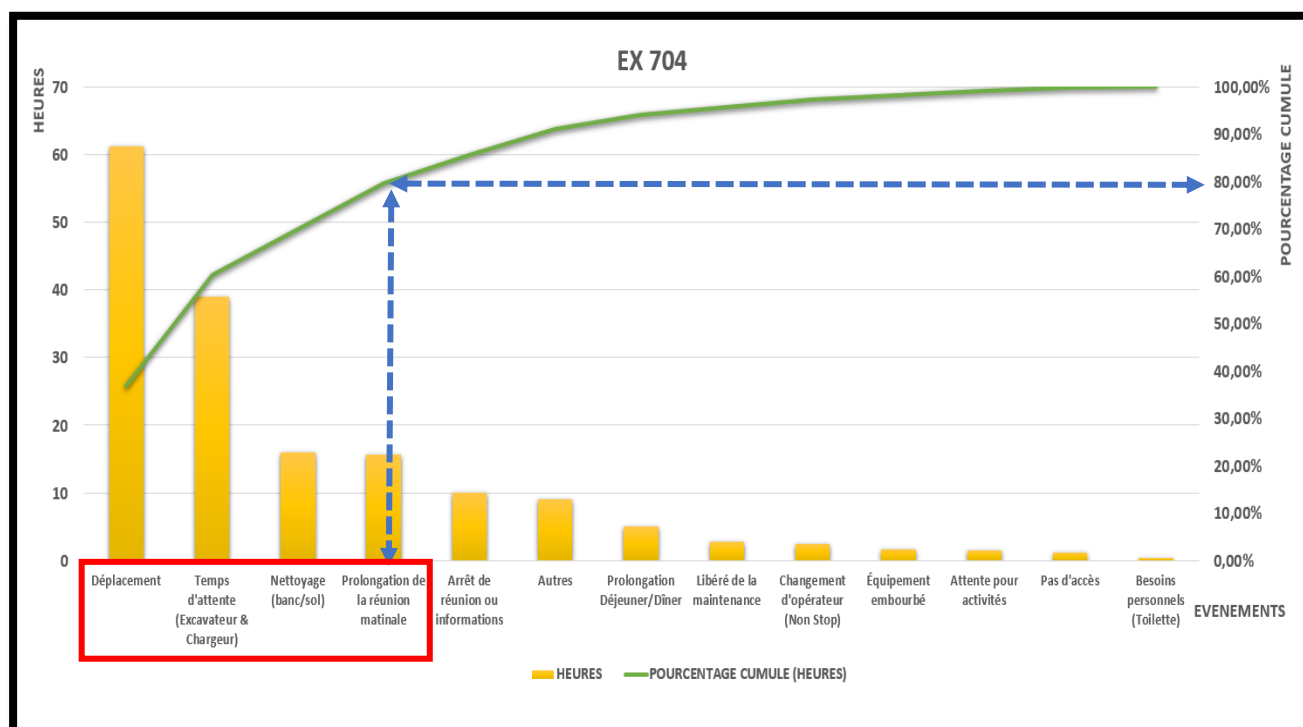


Figure 33 : Heures d'arrêt dues aux Standby et aux Delay sur la période d'étude pour pelle EX704

Comme pour EX701, EX702 et EX703, les causes majeures du bas taux de saturation de la pelle EX704 sont liées aux déplacements, aux temps d'attente, aux pauses plus ou moins longues et aux réunions matinales prolongées. Ces derniers sont à 80% responsables des temps d'inactivité. Outre ces événements, les attentes pour les activités de géologie et de topographie, les besoins personnels, les changements d'opérateurs et autres ont un impact qui est négligeable car, ils n'impactent que 20% de l'inutilisation de l'équipement.

À partir de l'analyse des arrêts de production des excavatrices EX701, EX702, EX703 et EX704, on peut déduire que les principales causes de temps d'inactivité sont les mêmes pour toutes : les déplacements, les temps d'attente, les nettoyages et les prolongations de réunions.

Ces facteurs représentent environ 80 % des interruptions, conformément au principe de Pareto, laissant d'autres causes mineures, tels que les changements d'opérateurs ou les besoins personnels, avec une contribution négligeable (environ 20 %). Ainsi, une gestion plus rigoureuse de ces facteurs majeurs pourrait considérablement améliorer le taux de saturation des équipements.

Pour toutes les excavatrices, ce sont les mêmes facteurs majeurs qui influencent le taux de saturation. De tous ces facteurs, nous pouvons réellement agir sur les temps d'attentes dans le but de les réduire. Ainsi, nous avons mesuré les **temps de cycles réels** des Tombereaux (Cf. **Tableau VII**) pour une meilleure allocation de ces derniers à chaque pelle.

Tableau VII : Temps de cycle des camions en fonction de la distance du trajet

				TEMPS DE CYCLES (Minute)		
TYPE DE MATERIAUX	LIEU DE DEVERSE	LIEU DE CHARGEMENT	DISTANCE MOYENNE (Km)	temps de cycle réalisé	temps de cycle visé	ecart
WASTE	WASTE DUMP BAOBAB	FOSSE KARI PUMP	2,4	22,2	20,5	-1,7
	KPNE	FOSSE KARI PUMP	2,1	15,5	14,4	-1,1
	TSF HOUNDE	FOSSE VINDALOO	5,0	35,1	33,9	-1,2
	WASTE DUMP VINDALOO	FOSSE VINDALOO	3,5	28,2	26,5	-1,7
ORE	ROMPAD VINDALOO	FOSSE VINDALOO	4,9	34	32,3	-1,7
	ROMPAD KP	FOSSE KARI PUMP	2,9	19,8	18,7	-1,1

Le tableau présente les temps de cycle des camions pour différents types de matériaux, à savoir les stériles et les minerais, en fonction des lieux de déversement. Pour les stériles, au Waste Dump Baobab, la distance parcourue depuis la fosse Kari Pump est de 2,4 km, avec un temps de cycle observé de 22,2 minutes, ce qui représente un écart de -1,7 minute par rapport à l'objectif de 20,5 minutes.

À KPNE, toujours depuis la fosse Kari Pump sur une distance de 2,1 km, le temps de cycle est de 15,5 minutes, affichant un écart de -1,1 minute par rapport aux 14,4 minutes visées.

De plus, au TSF Houndé, depuis la fosse Vindaloo sur une distance de 5,0 km, le cycle atteint 35,1 minutes, soit un écart de -1,2 minute comparée aux 33,9 minutes prévues. Enfin, au Waste Dump Vindaloo, avec une distance de 3,5 km depuis la fosse Vindaloo, le temps de cycle observé est de 28,2 minutes, soit un écart de -1,7 minute par rapport aux 26,5 minutes ciblées. Concernant les minerais, au Rompad Vindaloo, sur une distance de 4,9 km depuis la fosse Vindaloo, le temps de cycle enregistré est de 34 minutes, ce qui dépasse de -1,7 minute le temps visé de 32,3 minutes.

De même, au Rompad KP, avec une distance de 2,9 km depuis la fosse Kari Pump, le temps de cycle atteint 19,8 minutes, affichant un écart de -1,1 minute par rapport aux 18,7 minutes visées. Les écarts constatés entre les temps de cycle réels et les objectifs montrent que les camions mettent plus de temps que prévu à effectuer leurs cycles, quel que soit le type de matériau ou l'emplacement de déchargement. Ce dépassement est principalement attribuable aux rampes dont les pentes sont parfois trop raides et aux sections ne respectant pas les largeurs standard. Cela entraîne des temps d'attente pour les pelles et les camions car le cycle finit par être perturbé à un moment donné.

I.1.4. Productivité

Les résultats de productivité présentés dans ce paragraphe sont étroitement liés aux temps de cycle des pelles et au nombre de camions chargés par heure que nous avons récoltés sur la période d'étude.

Ainsi, à partir du nombre de camions chargés en moyenne par heure sur les trois (03) mois de l'étude, nous avons la productivité moyenne réalisée. En effet, lors de la prise du temps de cycle de camions, nous avons pris le tonnage de chaque camion et ils prenaient en moyenne 98 tonnes par voyage.

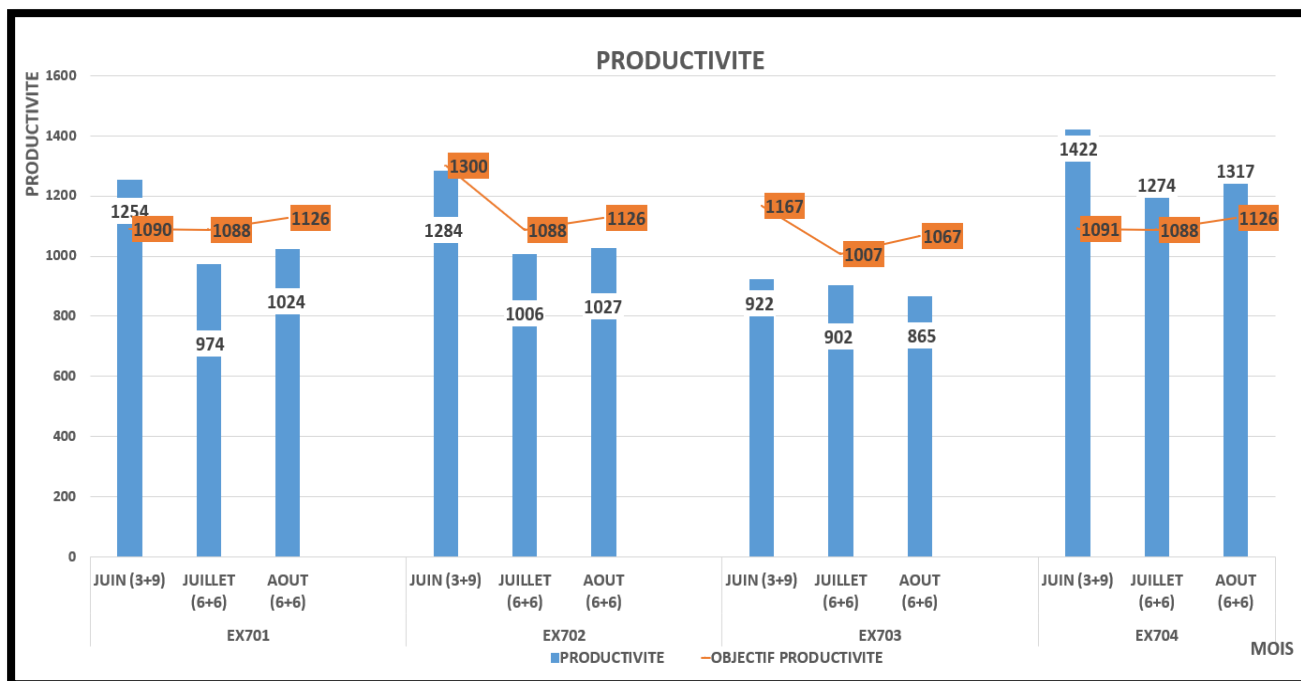


Figure 34 : Productivité des PC 2000 sur la période d'étude

Le graphique présente les productivités réelles et réalisées des équipements EX701, EX702, EX703 et EX704 sur la période d'étude. Il permettra d'évaluer la performance de chaque machine par rapport à l'objectif fixé.

Les excavatrices EX702 et EX703 n'ont pas atteint leurs objectifs de productivité sur la période étudiée, affichant respectivement des déficits de 6 % et 17 %. Par ailleurs, l'EX701 a atteint son objectif en juin, mais sa performance a chuté au cours des deux mois suivants, entraînant un déficit moyen de 1 % sur l'ensemble de la période. De son côté, l'EX704 se démarque nettement, enregistrant des résultats constants et supérieurs aux attentes avec une surperformance de 31 %. Cette régularité, observée depuis janvier, met en évidence sa fiabilité et son statut de "nouvelle pelle" par rapport aux autres excavatrices.

Pour mieux comprendre et expliquer les fluctuations observées dans les productivités des différentes pelles hydrauliques, nous avons réalisé une analyse approfondie des temps de chargement des camions et du nombre de voyages par heure enregistrés au cours de la période étudiée.

À partir de ces temps de cycle, nous avons également obtenu des informations comme le temps de chargement d'un camion (plus représentatif pour notre étude) et le nombre de godets réalisé par chargement. Ce dernier nous a permis de calculer le taux de remplissage du godet, nécessaire pour évaluer la dextérité de l'opérateur et la qualité du dynamitage.

Tableau VIII : Temps de cycle et temps de chargement obtenus sur la période d'étude

EXCAVATRICES	MOIS	Temps de cycle moyen (Seconde)	Temps de cycle planifié (Seconde)	Temps de chargement moyen réalisé (Minute)	Temps de chargement planifié (Minute)	Écart du temps de chargement par Excavatrice (Minute)
EX701	JUIN	34	42	3,4	3,5	-0,7
	JUILLET	30	42	4,0	3,5	
	AOUT	37	42	3,7	3,5	
EX702	JUIN	31	36	3,1	3,0	-0,7
	JUILLET	32	42	3,7	3,5	
	AOUT	33	42	3,8	3,5	
EX703	JUIN	27	39	4,1	3,2	-1,9
	JUILLET	27	45	4,0	3,7	
	AOUT	28	42	4,2	3,5	
EX704	JUIN	28	42	2,8	3,5	1,3
	JUILLET	33	42	3,3	3,5	
	AOUT	30	42	3,0	3,5	

Pour les excavatrices EX701, EX702, les temps de chargement se sont allongés respectivement de 0,7 minute par voyage sur la période d'étude. En particulier, l'EX703 a enregistré un allongement encore plus significatif, atteignant 1,9 minute supplémentaire par voyage, ce qui souligne un ralentissement notable du processus de chargement pour cet équipement.

L'excavatrice EX704 a affiché des performances supérieures sur la même période. Elle a réduit son temps de chargement de 1,3 minute par voyage d'où ses productivités. **(Cf. Tableau VIII)**

Le **Tableau IX** ci-dessous représentant le nombre de voyages réalisés par heure confirme nos résultats des temps de chargement obtenus.

Tableau IX : Nombre de camions chargés par heure

EXCAVATRICES	MOIS	Nombre de chargement par heure effectué	Nombre de chargement par heure planifié	Nombre de voyages perdus ou gagnés par heure sur les 3 mois
EX701	JUIN	12	12	-1
	JUILLET	10	12	
	AOUT	11	12	
EX702	JUIN	14	14	-1
	JUILLET	11	12	
	AOUT	11	12	
EX703	JUIN	10	13	-3
	JUILLET	10	11	
	AOUT	9	12	
EX704	JUIN	15	12	2
	JUILLET	13	12	
	AOUT	14	12	

Les longs temps de chargement et par conséquent la baisse de productivité sont influencés par plusieurs conditions de terrain, que nous présenterons ci-après.

Les conditions d'utilisation des pelles jouent un rôle important dans l'atteinte des objectifs de production. Cependant, notre étude a révélé que certaines de ces conditions, en particulier les temps de chargement des pelles, n'ont pas été respectées. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts.

Tout d'abord, la mauvaise fragmentation du matériau à excaver est un élément clé. La présence de gros blocs rend l'excavation difficile pour les pelles qui peinent à remplir correctement leurs godets. Cela prolonge le temps de chargement en obligeant l'augmentation du nombre de godets nécessaires pour remplir la benne des camions, ce qui ralentit l'ensemble du processus.

En effet, les taux de remplissage réalisés par la plupart des excavatrices sur la période d'étude (77% à Kari Pump et 56% à Vindaloo Main) sont inférieurs à celui acceptable à la mine d'or de Houndé dans la roche saine qui est de 80% à 85%. (Cf. **Annexe VIII**).

Cela se confirme par le fait que les temps de cycle des différentes pelles ont été bons dans l'ensemble.

Notons que la majorité des longs temps de chargement a été observée lors du ramassage du heave et du premier banc où il y a le plus de gros blocs après le blast.

Ensuite, le temps d'attente des pelles est un autre facteur important, souvent lié au retard dans l'arrivée des camions. Ce problème découle d'un nombre insuffisant de camions disponibles ou d'une mauvaise allocation des camions.

La performance des opérateurs joue également un rôle direct dans l'efficacité des cycles de travail des pelles. Une mauvaise manipulation peut prolonger inutilement le temps de chargement. En effet, nous avons enregistré sur une période donnée de notre étude pour deux (02) opérateurs différents, sur le même banc bien fragmenté, le nombre de godets moyens réalisé pour remplir un camion. **(Cf. Annexe IX)**

En outre, les zones de chargement souvent étroites compliquent les manœuvres des camions, les obligeant à stationner loin des pelles. Cette situation entraîne des retards supplémentaires, augmentant le temps d'attente des pelles et perturbant davantage le processus de chargement. **(Cf. Annexe X)**

Les opérations de chargement en double banc, qui consistent généralement à charger depuis un banc principal et à un autre niveau ou banc supplémentaire (banc + heave) augmentent le nombre de mouvements que les excavatrices doivent effectuer. Cela entraîne un allongement des cycles de chargement, car les pelles doivent se repositionner et ajuster leurs manœuvres plus fréquemment, ce qui rallonge les temps de chargement. **(Cf. Tableau VIII)**

Par ailleurs, l'état de vétusté des équipements joue un rôle important dans le ralentissement du processus de chargement. Les excavatrices plus anciennes ont tendance à être moins performantes, en raison de leur usure et de leur perte de puissance avec le temps. Ces différents facteurs combinés contribuent à l'allongement des temps de chargement et à la baisse de productivité.

Quant à la nouvelle excavatrice EX704, avec sa force et sa puissance optimales, enregistre les meilleurs temps de chargement sur la période d'étude, démontrant ainsi l'importance de disposer d'équipements modernes et bien entretenus pour maximiser l'efficacité des opérations.



I.2. État des lieux des rampes

Certaines sections des rampes utilisées dans le processus de production à la mine d'or de Houndé (Vindaloo Main et Kari Pump) présentent des largeurs inférieures aux standards requis, mesurant 18 mètres en moyenne au lieu des 22 mètres recommandés. Cette réduction de largeur restreint l'espace de manœuvre des camions, entraînant un ralentissement significatif du flux de circulation. Par conséquent, cela provoque une augmentation des temps d'attente, car les camions se retrouvent le plus souvent en situation d'encombrement ou doivent attendre leur tour pour passer.

De plus, la pente moyenne observée sur ces rampes est de 13 %, alors que la norme préconise une inclinaison maximale de 10 %. Cette pente plus élevée a un impact direct sur la vitesse de déplacement des camions qui doivent ralentir pour assurer leur sécurité et maintenir la stabilité du chargement.

Pour la forme de la rampe, nous avons obtenu à partir du logiciel GEOVIA SURPAC des cartes montrant le profil initial prévu et celui réalisé pour les rampes au niveau des différentes fosses qui concernent notre étude. Elles montrent que la forme des rampes est plus ou moins respectée au niveau des deux (2) fosses. **(Cf. Annexe XI et XII).**

I.3. Evaluation des pertes

Dans cette section, nous aborderons les pertes de matériaux causées par les indicateurs de performance clés (KPI) inférieurs que nous avons obtenus. Ces pertes résultent directement des niveaux de performance en deçà de nos attentes, affectant la quantité de matériaux que nous avons été en mesure de déplacer efficacement.

I.3.1. Pertes dues aux retards opérationnels

Cela représente la quantité de matériaux que nous aurions pu déplacer si les retards avaient été éliminés. En d'autres termes, ces retards ont directement impacté notre capacité de production en limitant la quantité totale de matériaux déplacés. Si ces interruptions ou délais n'avaient pas eu lieu, nous aurions pu atteindre une production plus élevée.

Tableau X : Pertes dues aux retards opérationnels

PERTES DUES AUX STANDBY ET AUX DELAY (TAUX DE SATURATION)				
	HEURES DE STANDBY ET DE DELAY	MOYENNE DES VOYAGES VISES / EXCAVATRICE / HEURE	PERTES / PELLE (Tonne)	PERTES JUIN-AOUT (Tonne)
EX 701	184	12	216 384	-787 038
EX 702	159	13	202 566	
EX703	147	12	172 872	
EX 704	166	12	195 216	

Les périodes de standby et de delay des pelles hydrauliques PC 2000 ont entraîné une perte de production estimée à environ **787 000 tonnes** de matériaux durant la période d'étude.

I.3.2. Pertes dues aux temps de chargement

Il s'agit de la quantité de matériaux que nous aurions pu déplacer si les durées des temps de chargement avaient été réduites. En réduisant ces temps, il aurait été possible d'augmenter notre productivité en minimisant les périodes d'inactivité ou les temps d'attente, ce qui aurait permis de déplacer une quantité de matériaux plus importante sur la même période.

Tableau XI : Pertes dues aux longs temps de chargement

PERTES DUES AUX LONGS TEMPS DE CHARGEMENT (PRODUCTIVITE)			
EXCAVATRICES	PERTES EN TONNE PAR EXCAVATRICE	PERTES/GAINS EN TONNE	PERTES EN TONNE SUR TOUTE LA PERIODE
EX 701	-135 995	-641 244	-326 664
EX 702	-149 509		
EX 703	-355 740		
EX 704	314 580	314 580	

Selon le tableau, les excavatrices PC 2000 EX701, EX702 et EX703 ont cumulé une perte de production de l'ordre de **641 000 tonnes** de matériaux. À l'inverse, l'excavatrice EX704 a permis de rattraper une partie de ces pertes en générant un gain de **315 000 tonnes** de matériaux. En fin de compte, lorsque l'on combine ces résultats, les excavatrices PC 2000 ont globalement contribué à une perte nette de **327 000 tonnes** de matériaux de juin à août.

En somme, si l'on additionne les pertes de **787 000 tonnes** dues aux standby et delay des PC 2000, avec la perte nette de **327 000 tonnes** résultant des longs temps de chargement, le total des matériaux perdus s'élève à **1 113 700 tonnes** sur la période d'étude.



II. RECOMMANDATIONS

Dans ce paragraphe, nous présenterons des mesures correctives visant à résoudre les diverses difficultés rencontrées par les indicateurs de performance clés (KPI), qui les empêchent d'atteindre les objectifs fixés. Ces mesures auront pour but d'identifier et de traiter les sources de ces difficultés, qu'il s'agisse des retards opérationnels, des problèmes de disponibilité des équipements ou d'autres facteurs limitant la productivité. L'objectif est d'améliorer les processus, la fiabilité des équipements et de maximiser l'efficacité des opérations pour que les KPIs atteignent les niveaux de performance souhaités.

II.1. Mise en place d'un système d'amélioration

Nous avons mis en place un système d'allocation des camions aux différentes pelles, que nous appelons la "grille de productivité". Cette grille prend en compte plusieurs paramètres, tels que la distance entre le point de chargement et le point de déversement ainsi que la productivité cible à atteindre ou déjà réalisée. En utilisant ces informations, elle permet de déterminer le nombre optimal de camions à affecter à chaque pelle. L'objectif est de minimiser les temps d'attente et d'assurer un flux continu de transport, ce qui améliore l'efficacité globale des opérations de chargement et de transport sur le site. Ce système contribue ainsi à maximiser le taux de saturation des camions disponibles tout en augmentant la productivité des pelles.

		NOMBRE DE CAMIONS PAR PELLE								
		3	4	5	6	7	8	9	10	
DISTANCE (Km)	1	568	1136	1705	2273	2841	3409	3977	4546	PRODUCTIVITE (T/H)
	2	387	775	1162	1550	1937	2325	2712	3100	
	3	294	588	882	1176	1470	1764	2058	2352	
	4	237	474	710	947	1184	1421	1658	1894	
	5	198	397	595	793	991	1190	1388	1586	
	6	171	341	512	682	853	1023	1194	1364	
	7	150	299	449	598	748	897	1047	1197	
	8	133	266	400	533	666	799	932	1066	
	9	120	240	360	480	600	720	841	961	
	10	109	219	328	437	547	656	765	874	

Figure 35 : La grille de productivité

II.1.1. Apport de la grille

La quantité supplémentaire de matériaux que nous pourrions déplacer sur une période de trois (03) mois dépend de la mise en œuvre correcte de la grille de productivité. Nous présentons ci-dessous l'impact économique potentiel de cette grille.

Tableau XII : Apport économique de la grille de productivité proposée

GAINS POTENTIELS GENERES PAR LA GRILLE DE PRODUCTIVITE					
	TEMPS D'ATTENTES DE LA PELLE (Heures)	90% DES TEMPS D'ATTENTES (Heures)	MOYENNE DES VOYAGES REALISEES / EXCAVATRICE / HEURE	GAINS / PELLE (Tonne)	GAINS JUIN-AOUT (Tonne)
EX 701	29	26	11	28 524	103 459
EX 702	24	21	12	25 084	
EX 703	14	12	9	10 954	
EX 704	32	28	14	38 896	

La mise en œuvre de ce modèle pourrait nous permettre de gagner, sur une période de **trois (03) mois**, environ **103 000 tonnes** supplémentaires en termes de volume de matériaux déplacés. En plus de cela, cette approche stratégique pourrait avoir des répercussions positives sur nos coûts d'exploitation et sur notre rentabilité, tout en contribuant à atteindre nos objectifs de production.

II.2. Autres recommandations

Les mesures correctives que nous proposons interviennent à plusieurs niveaux et sont conçues pour nous permettre d'atteindre les objectifs fixés pour les indicateurs de performance clés (KPIs). Ces actions visent à optimiser la disponibilité des équipements, à réduire les retards opérationnels et à améliorer la productivité des engins. En appliquant ces mesures de manière rigoureuse, nous pourrions corriger les défaillances observées, améliorer l'utilisation des ressources disponibles et aligner les performances réelles avec les cibles de productivité définies. L'objectif final est de garantir une amélioration continue des opérations et de renforcer l'efficacité globale du processus de production.

✚ Au niveau de la maintenance et de l'entretien des PC 2000

- **La formation des équipes de maintenance** : créer un catalogue des pannes récurrentes et former les techniciens sur les meilleures pratiques pour les diagnostiquer et les réparer rapidement et efficacement.
- **L'inspection et l'entretien régulier des carreaux de chargement et de dépôt** : utiliser des bulldozers pour maintenir les zones de chargement propres, réduisant ainsi les interruptions et les dégradations des équipements. En effet, il est souhaitable d'avoir un bulldozer devant toute pelle qui effectue une opération de chargement.

✚ Au niveau de la gestion des opérations et de productivité

- **Le respect de la répartition des camions par pelle** : optimiser le nombre de camions affecté à chaque pelle pour éviter les temps d'attente excessifs des deux (02) côtés (appliquer la grille de productivité). Réduire l'auto-répartition par les opérateurs de pelles et de camions eux-mêmes.

- **Le suivi des temps de chargement des pelles hydrauliques** : établir un suivi en temps réel des cycles de chargement pour corriger les inefficacités et évaluer la qualité du dynamitage.
- **La gestion stricte des temps de réunions et de déjeuner** : organiser les réunions matinales dès que tous les cars sont arrivés pour éviter de déborder sur le temps imparti et respecter le temps du déjeuner.
- **La mise en place d'un système rapide de lancement de poste** : laisser un certain nombre de camions dans la fosse en fonction des conditions météorologiques pour faciliter le lancement du poste suivant, en assurant une bonne communication entre les opérateurs pour l'évacuation des camionneurs des camions concernés.

Au niveau de la formation et du développement des compétences

- **La formation et la sensibilisation des opérateurs** : continuer à former régulièrement les opérateurs sur les bonnes pratiques et les consignes de sécurité pour réduire les erreurs de manipulation et de positionnement ainsi que les temps d'arrêt opérationnels. Par exemple, il est recommandé de charger à un angle de 45 degrés côté visible afin de limiter les mouvements de rotation de la pelle, ce qui réduit également le temps de chargement des camions. Cette méthode permet également d'éviter que des blocs ne tombent sur des parties sensibles du camion, comme le réservoir lors des mouvements de la pelle.
- **L'amélioration de la communication entre les départements** : renforcer la coordination entre les équipes de production et de maintenance pour accélérer les interventions et réduire les temps d'arrêt.

Au niveau du forage et du dynamitage

- **Le renforcement du contrôle qualité (QA/QC)** : intensifier les contrôles qualité des trous forés pour garantir la précision et la conformité des forages réalisés.
- **L'amélioration continue des paramètres de forage et de dynamitage** : ajuster les paramètres de forage et de dynamitage pour obtenir une bonne fragmentation des matériaux après le tir (notamment au niveau du heave et du premier banc), améliorant ainsi l'efficacité des pelles et des camions.



Au niveau de la gestion des infrastructures de transport

- **Le suivi régulier des rampes par les topographes** : s'assurer que les rampes respectent les normes de largeur et de pente pour des déplacements rapides et sécurisés des engins.
- **La gestion de la charge utile** : respecter les consignes de chargement de BIA (95 à 105 % de la charge utile cible) pour éviter les surcharges qui ralentissent les cycles des camions et augmentent les temps d'attente des pelles.

CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif d'étudier les indicateurs de performance des pelles KOMATSU PC 2000. Pour atteindre cet objectif, nous avons d'abord calculé les indicateurs clés de performance (KPI) en identifiant les facteurs influençant ces derniers. Nous avons ensuite évalué les pertes liées aux insuffisances du processus actuel et proposé un système d'amélioration.

Les résultats montrent que seule la pelle **EX704** a atteint son objectif de productivité sur les trois mois étudiés, permettant un gain de **315 000 tonnes** de matériaux. Par ailleurs, les pelles PC 2000 **EX701**, **EX702** et **EX703** n'ont pas atteint leurs objectifs, entraînant une perte estimée à **641 000 tonnes** sur la même période. Le taux de saturation moyen des pelles a été de **76 %**, légèrement en dessous de l'objectif de **78 %**, et a été affecté par des standby et des retards liés aux déplacements excessifs, aux temps d'attente des pelles puis aux prolongations des réunions et pauses déjeuner, engendrant une perte totale de **700 000 tonnes**. Les conditions de terrain, telles que des rampes de **18 mètres** de large au lieu des **22 mètres** recommandés et une pente moyenne de **13 %** au lieu des **10 %** standards ont également ralenti le flux des camions et allongé les temps de cycle.

Au total, ces problèmes de performances ont causé une perte cumulée de plus de **1 200 000 tonnes** sur trois mois.

Pour corriger ces insuffisances, nous avons mis en place une grille de productivité permettant d'allouer les camions aux pelles de manière plus efficace. Cette mesure, combinée à des recommandations tels que l'amélioration des paramètres de dynamitage et le suivi rigoureux des rampes par les topographes pourrait permettre de déplacer au minimum environ **103 000 tonnes** supplémentaires de matériaux en trois mois.

Pour aller plus loin, il serait pertinent d'élargir les travaux à l'évaluation des effets des conditions de terrain sur les performances des camions en étudiant des paramètres comme la résistance au roulement pour améliorer d'avantage la grille proposée.

BIBLIOGRAPHIE

ABITO, H. (2024). Évaluation et amélioration de l'efficacité globale des excavateurs et du dispatch du système pelle-camions à la Mine d'Or d'Abujar. TFE, Institut National Polytechnique Felix Houphouët Boigny, 73p.

BARRERE, J., SLANSKY, M. (1965). Notice explicative de la carte géologique au 2.000.000 de l'Afrique Occidentale. Mém. du B.R.G.M. N° 29.

C.I.E.H.-B.R.G.M. (1988). Système d'observation des eaux souterraines. Document guide pour la conception et l'installation de système d'observation des eaux souterraines dans les pays membres du C.I.E.H. Ouagadougou.

ENDEAVOUR MINING (2017). Rapports du département géologie.

ENDEAVOUR MINING (2017). Rapport technique du projet Houndé.

FAKOUNDE (2019). Analyse de la performance des systèmes de collecte et de traitement des événements indésirables dans les entreprises à Haut Niveau de Risques (HRO). Mémoire de Master 2, Université de Liège, 63p.

HOTTIN, G., OUEDRAOGO, O.F. (1975). Notice explicative de la carte à 1/1.000.000 de la République de HAUTE-VOLTA. Paris, édition du B.R.G.M. MA

KAMULETE, M. N. (2014). Cours d'exploitation des mines à ciel ouvert. Université de Lubumbashi faculté Polytechnique, Département des mines, 256p.

KEBAR, A. B., BOUMEZBEUR, Y. (2025). Etude du processus de chargement et de transport dans une mine à ciel ouvert. Cas de la mine de Boukhadra. Mémoire de Master 2, Université Larbi Tebessi – Tébessa, 119p.

KOMATSU (2006). Specifications & Application Handbook Edition 27, 964p.

KOMATSU (2017). PC2000-8, 20p.

KOMATSU (2024). PC2000-11, 20p.

LAFONTAINE, E. (2006). Méthodes et mesures pour l'évaluation de la performance et de l'efficacité des équipements miniers de production. Mémoire de Master 2, Université de Laval, 133p.



OUEDRAOGO, I. (1994). Géologie et hydrogéologie des formations sédimentaires de la boucle du Mouhoun (Burkina Faso). Thèse de doctorat publiée, Faculté des Sciences et Techniques de Dakar, 116 p.

VACHON, J. (1997). Étude Sur La Fiabilité Et La Maintenabilité Des Chargeuses-Navettes A La Mine Doyon. Mémoire de Master 2, Université de Laval, 272p.



ANNEXES



LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Fiche des temps de cycles des pelles.....	iii
Annexe II : Fiche des temps de cycle des camions	iii
Annexe III : MTBF	iv
Annexe IV : MTTR.....	iv
Annexe V : Disponibilités des PC 2000 de Juin à Aout 2024.....	iv
Annexe VI: Taux de saturation des PC 2000 de juin à août	v
Annexe VII: Productivités des PC 2000 de juin à août.....	v
Annexe VIII: Taux de remplissage du godet	v
Annexe IX: Temps de chargement de 2 opérateurs différents sur le même banc et dans les meilleures conditions.....	vi
Annexe X : DT faisant une longue marche arrière dans un couloir	vi
Annexe XI : Forme de la rampe à VINDALOO MAIN	vii
Annexe XII: Forme de la rampe à KARI PUMP	vii

Annexe I : Fiche des temps de cycles des pelles

[illegible]

Annexe II : Fiche des temps de cycle des camions

[illegible]



Annexe III : MTBF

		MTBF	OBJECTIF MTBF
EX701	JUIN	126,43	80
	JUILLET	116,06	80
	AOUT	46,11	80
EX702	JUIN	52,24	80
	JUILLET	45,43	80
	AOUT	58,20	80
EX703	JUIN	29,03	80
	JUILLET	42,25	80
	AOUT	37,92	80
EX704	JUIN	168,00	80
	JUILLET	174,66	80
	AOUT	86,72	80

Annexe IV : MTTR

		MTTR	OBJECTIF MTTR
EX701	JUIN	13,39	6
	JUILLET	1,59	6
	AOUT	3,28	6
EX702	JUIN	1,41	6
	JUILLET	3,86	6
	AOUT	3,99	6
EX703	JUIN	10,94	6
	JUILLET	8,85	6
	AOUT	8,53	6
EX704	JUIN	3,43	6
	JUILLET	2,83	6
	AOUT	3,59	6

Annexe V : Disponibilités des PC 2000 de Juin à Aout 2024

		DISPONIBILITE	OBJECTIF DISPONIBILITE
EX701	JUIN	70%	89%
	JUILLET	94%	89%
	AOUT	87%	87%
EX702	JUIN	94%	87%
	JUILLET	85%	89%
	AOUT	86%	89%
EX703	JUIN	61%	89%
	JUILLET	74%	87%
	AOUT	71%	89%
EX704	JUIN	93%	91%
	JUILLET	94%	91%
	AOUT	93%	89%



Annexe VI: Taux de saturation des PC 2000 de juin à août 2024

		UTILISATION DISPONIBILITE	OBJECTIF UTILISATION DISPONIBILITE
EX701	JUIN	78%	78%
	JUILLET	72%	78%
	AOUT	77%	78%
EX702	JUIN	80%	78%
	JUILLET	76%	78%
	AOUT	78%	78%
EX703	JUIN	82%	78%
	JUILLET	80%	78%
	AOUT	78%	78%
EX704	JUIN	80%	78%
	JUILLET	76%	78%
	AOUT	78%	78%

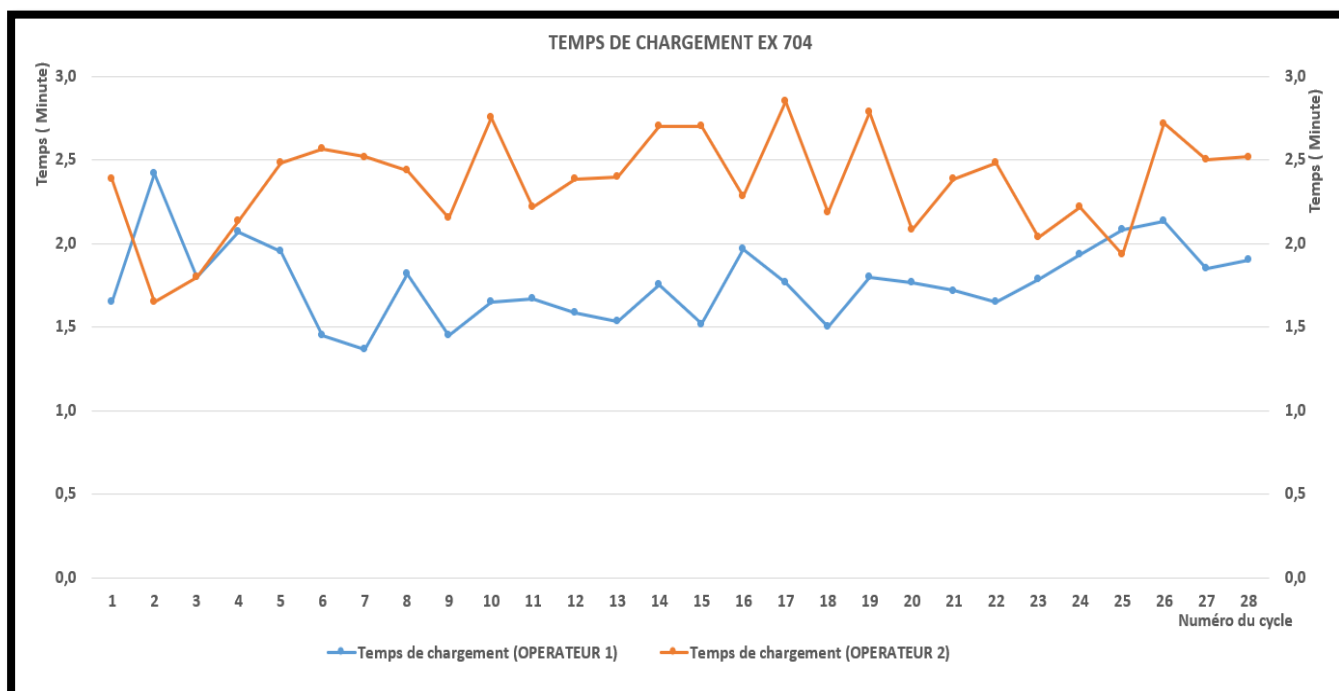
Annexe VII: Productivités des PC 2000 de juin à août

		PRODUCTIVITE	OBJECTIF PRODUCTIVITE
EX701	JUIN (3+9)	1254	1090
	JUILLET (6+6)	974	1088
	AOUT (6+6)	1024	1126
EX702	JUIN (3+9)	1284	1300
	JUILLET (6+6)	1006	1088
	AOUT (6+6)	1027	1126
EX703	JUIN (3+9)	922	1167
	JUILLET (6+6)	902	1007
	AOUT (6+6)	865	1067
EX704	JUIN (3+9)	1422	1091
	JUILLET (6+6)	1274	1088
	AOUT (6+6)	1317	1126

Annexe VIII: Taux de remplissage du godet

EXCAVATRICES	MOIS	Nombre de godets effectués par chargement	Nombre de godets planifié par chargement	Taux de remplissage du godet réalisé	Taux de remplissage du godet planifié	ECARTS
EX701	JUIN	6	5	83%	80%	4%
	JUILLET	8	5	63%	80%	-22%
	AOUT	7	5	71%	80%	-11%
EX702	JUIN	6	5	83%	80%	4%
	JUILLET	7	5	71%	80%	-11%
	AOUT	7	5	71%	80%	-11%
EX703	JUIN	9	5	56%	80%	-31%
	JUILLET	9	5	56%	80%	-31%
	AOUT	9	5	56%	80%	-31%
EX704	JUIN	6	5	83%	80%	4%
	JUILLET	6	5	83%	80%	4%
	AOUT	6	5	83%	80%	4%

Annexe IX: Temps de chargement de 2 opérateurs différents sur le même banc et dans les meilleures conditions

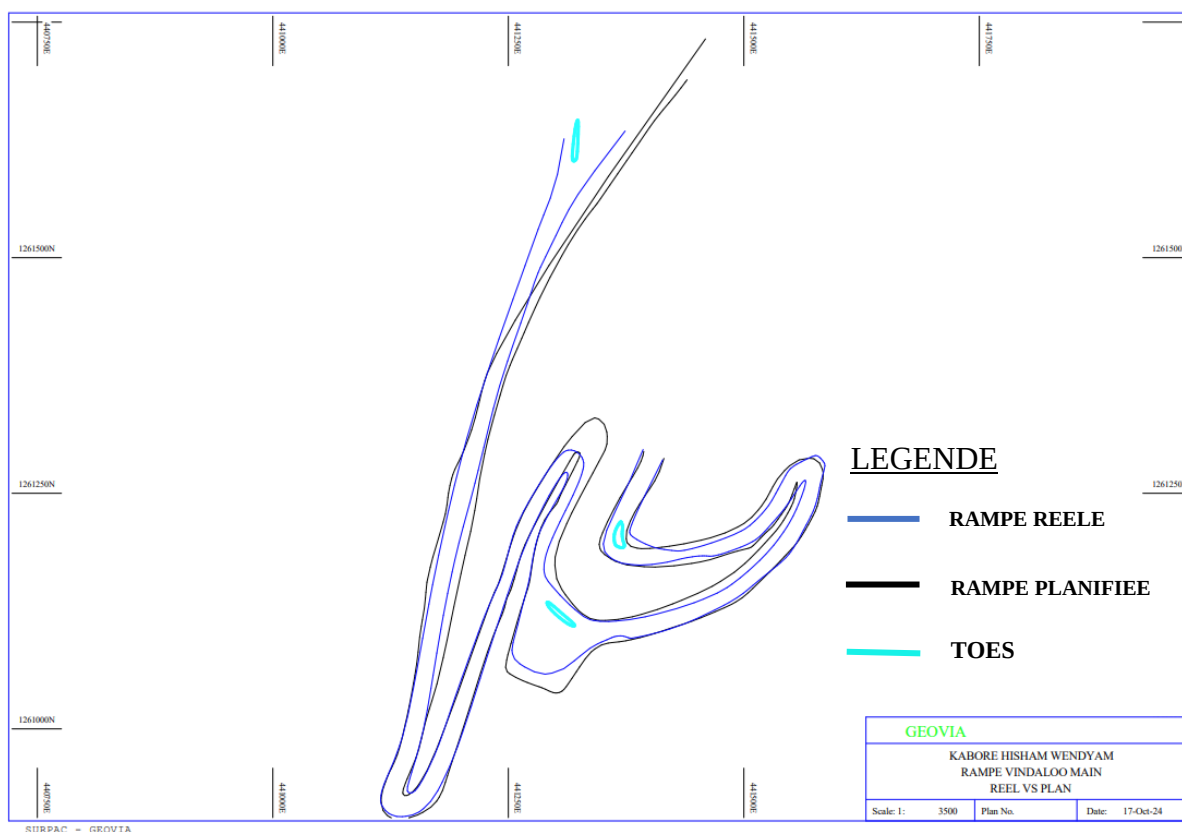


Annexe X : DT faisant une longue marche arrière dans un couloir





Annexe XI : Forme de la rampe à VINDALOO MAIN



Annexe XII: Forme de la rampe à KARI PUMP

