

Article Type: Research Article

Received: 07/08/2024

Accepted: 07/01/2025

Published: 19/01/2025

Volume/Issue: 2(1)

Pub Date Season: Winter

Pages: 1-22

Cite as : Tolo, H., Thiam, M. & Sylla, M. (2025). Etude d'optimisation des paramètres de productivité des engins de chargement et de transport de la mine souterraine. *Interdisciplinary Finance and Development Journal*, 2(1), 1-22.

## Etude d'optimisation des paramètres de productivité des engins de chargement et de transport de la mine souterraine

Hamidou TOLO<sup>1</sup>, Moussa THIAM<sup>2</sup>, Massire SYLLA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Société de mines de Loulou, BARRICK Mali

<sup>2</sup>Ecole Normale d'Enseignement Technique et Professionnel, Mali, [moussathiam88@gmail.com](mailto:moussathiam88@gmail.com), ORCID : 0009-0009-8880-0136

<sup>3</sup> Société de mines de Loulou, BARRICK Mali

DOI : 10.5281/zenodo.14691015

### RÉSUMÉ

Les méthodes et les techniques de répartition et de gestion des engins de chargement et de transport dans les mines souterraines sont conçus pour augmenter la productivité des opérations de manutention minière souterraine. Comparativement aux mines à ciel ouvert qui ont adopté rapidement cette technologie, les mines souterraines tardent à les implanter. La raison principale de ce retard vient des caractéristiques propres aux mines souterraines, comme les difficultés de communication et les réseaux de transport, qui ne permettent pas l'implantation des systèmes disponibles sur le marché en amont. Ce présent travail traite une stratégie d'optimisation, de maximiser la productivité des engins de chargement et de transport afin de réduire les paramètres qui y impactent négativement dans le but d'atteindre les objectifs recherchés en termes de tonnage tout en évitant les pertes de temps et du coût superflus. Un prototype et une interface homme-machine ont été minutieusement analysés pour parvenir à ce résultat. A travers l'interface, nous pouvons connaître en temps réel la position de ces engins, leurs arrêts et leurs mouvements à l'intérieur de la mine souterraine. Nous pouvons également savoir si les valeurs des trois performances clés (utilisation, efficacité et productivité) sont optimales. Quant au prototype, il dispose d'un système de nœuds qui reçoivent des signaux des capteurs installés dans ces engins de chargement et de transport afin de les repérer dans la flotte souterraine. Dans cet article, le système développé est fait spécifiquement pour les mines souterraines particulièrement celles de LOULO-GOUNKOTO, traitant à la fois les problèmes d'ordonnancement, de répartition et de production industrielle de la mine. Et les différentes principales étapes ont été effectuées pour mieux optimiser le système telles que l'évaluation et l'analyse (en effectuant une évaluation approfondie de l'ensemble du processus existants, identifiant les inefficacités et les domaines nécessitant des améliorations), la mise en œuvre des améliorations (en mettant en œuvre des solutions telles que NEWTRAX et le calcul des productions théoriques, instantanées et industrielles) et les recommandations et suggestions de l'établissement d'une surveillance continue et ajustement du système.

**Mots clés :** Optimisation, Performances Clés, Prototype, Productivité, Flotte.

## Study on optimizing the productivity parameters of loading and transport equipment in the underground mine

### ABSTRACT

Methods and techniques for dispatching and managing loading and conveying equipment in underground mines are designed to increase the productivity of underground mining handling operations. Compared to open-pit

*mines, which have been quick adopters of this technology, underground mines have been slow to implement them. The main reason for this delay is the specific characteristics of underground mines, such as communication difficulties and transportation networks, which do not allow for the implementation of systems available on the upstream market. This work deals with a strategy of optimization, maximizing the productivity of loading and transport equipment in order to reduce the parameters that negatively impact it in order to achieve the desired objectives in terms of tonnage while avoiding unnecessary loss of time and cost. A prototype and a human-machine interface were thoroughly analyzed to achieve this result. Through the interface, we can know in real time the position of these devices, their stops and their movements inside the underground mine. We can also find out if the values of the three key performances (utilization, efficiency and productivity) are optimal. As for the prototype, it has a system of nodes that receive signals from the sensors installed in these loading and transport vehicles in order to locate them in the underground fleet. In this article, the system developed is made specifically for underground mines, particularly those of LOULO-GOUNKOTO, dealing with the problems of scheduling, distribution and industrial production of the mine. And the various main steps have been carried out to better optimize the system such as evaluation and analysis (by carrying out a thorough evaluation of the entire existing process, identifying inefficiencies and areas in need of improvement), implementation of improvements (by implementing solutions such as NEWTRAX and calculation of theoretical productions, and recommendations and suggestions for the establishment of continuous monitoring and adjustment of the system.*

**Keywords:** Optimization, Management, Key Performance, Productivity, Utilization, Fleet, Prototype, Efficiency.

## INTRODUCTION

L'hypothèse de l'avènement d'une nouvelle ère technologique fondée sur la créativité est aujourd'hui largement avérée. La créativité et l'innovation présentent de nouveaux défis (Pourrahimian & Eugene, Recent Advances in Underground Mine Planning and Scheduling, 2023) aux exploitations minières souterraines : il s'agit d'innover la gestion de la flotte de chargement et transport souterrains afin de répondre de façon efficiente et efficace aux demandes des entreprises minières.

Les temps de cycle des équipements sont une variable critique dans la productivité des mines souterraines. Des études ont montré que l'utilisation de modèles mathématiques et d'algorithmes d'optimisation, tels que les approches de Monte Carlo, permet de réduire les temps morts et d'améliorer l'efficacité globale (Pourrahimian & Eugene, Recent Advances in Underground Mine Planning and Scheduling, 2023). La simulation basée sur des données réelles (données récoltées sur le terrain) aide à identifier les inefficacités et à évaluer l'impact de différentes configurations d'équipements. Des logiciels tels que Arena et Talpac sont fréquemment utilisés pour ces analyses (Aloui, 2022). L'automatisation des camions et des chargeurs a révolutionné les opérations souterraines. Les équipements autonomes augmentent la sécurité tout en réduisant la variabilité des cycles, ce qui mène à une productivité accrue (Hebblewhite, 2020). L'intégration de capteurs IoT sur les engins permet une surveillance en temps réel des performances, facilitant une maintenance prédictive et optimisant la disponibilité des machines (ZHANG, 2021). L'application de modèles probabilistes pour analyser la fiabilité des engins de chargement et de transport a permis de prolonger leur durée de vie et de réduire les arrêts imprévus (Brown, 2019). Une étude de cas récente sur une mine souterraine en Amérique du Nord a montré que la maintenance basée sur l'état des équipements (CBM) « condition-based maintenance » réduisait les coûts opérationnels de 15 % tout en augmentant la disponibilité des engins (Report, 2020).

Une mine d'or en Chine a utilisé des simulations pour réorganiser les itinéraires des camions, augmentant leur productivité de 20 % en réduisant les distances parcourues et les temps morts (Liu, 2022).

Une mine de nickel a adopté des systèmes autonomes pour ses chargeurs et camions, augmentant la productivité globale de 18 % en un an (Pourrahimian, Intelligent Mining Systems: Applications and Benefits, 2023).

En effet, dans toute exploitation minière, les processus de chargement et de transport sont primordiaux, ces deux processus représentent de 40 à 60% du coût technique de l'extraction (Ben-Awuah & Yashar, 2023), on mesure l'importance que représente l'étude détaillée de ces deux postes. Ils nécessitent en matière d'engins, des matériels de plusieurs types et de différentes puissances et capacités.

Bien qu'il existe de nombreuses combinaisons qui permettent d'optimiser la fonction chargement roulage, dans les exploitations des mines souterraines, on distingue une combinaison très fréquente, c'est la combinaison de chargeuse souterraines sur pneu ('BOGGER'), avec plusieurs camions souterrains (trucks), dans certain cas, on envisage aussi l'utilisation d'un convoyeur à bande, cette combinaison s'avère être la plus bénéfique; dans ce mémoire on a préféré centrer notre travail sur les engins de chargement et de transport de la mine souterraine de Yaléa et sur l'optimisation de leurs paramètres.

Dans un tel contexte, la mise en place d'un système innovant s'impose : l'analyse minutieuse d'un prototype électronique et surtout d'une interface analogique pilotable depuis un ordinateur. On pourra à partir de l'interface, remédier ou diminuer les temps morts ou perdus inutilement au cours de l'opération et permettre aux mines en exploitations souterraines de faire une production optimale.

Cet article vise à développer ou trouver une stratégie d'optimisation, de maximiser la productivité des engins de chargement et de transport afin de réduire les paramètres qui y impactent négativement dans le but d'atteindre les objectifs recherchés en termes de tonnage tout en évitant les pertes de temps et du coût superflus.

L'hypothèse abordée tout au long de notre travail se résume en ces questions suivantes :

- ❖ Quels sont les éventuels paramètres de chargement et de transport ?
- ❖ Comment pouvons-nous optimiser ces derniers pour augmenter la production annuelle de la mine ?

## **I.1 OBJECTIFS**

Afin de répondre à ces questions il faut au préalable connaître :

- ❖ Les caractéristiques techniques et capacités des engins de chargement et de transport ;
- ❖ Les distances de transport (entre le front de travaux et la station de concassage) ;
- ❖ Analyse minutieuse du prototype électronique NEWTRAX
- ❖ Les paramètres influençant sur la productivité de ces engins ;
- ❖ La productivité annuelle de la mine et le régime de travail.

## **I.2 MATERIELS ET METHODES**

Une méthodologie mixte est adoptée pour la réalisation de ce projet. Nous allons d'abord dégager les généralités sur le chargement et le transport de l'exploitation minière souterraine, ensuite, mener une étude sur le prototype NEWTRAX et sur l'environnement d'installation des accessoires de ce dernier et enfin d'effectuer une approche analytique sur l'optimisation du système de chargement et de transport de la mine souterraines de YALEA.

Basé sur la plateforme unique (Platform, s.d.) du serveur de BARRICK corporation et de NEWTRAX, les données en temps réel, la sécurité et la productivité accrues, le système d'optimisation minière avec NEWTRAX est une solution spéciale pour aider les entreprises en exploitation souterraine. Il les aide à surveiller en temps réel les personnels, les machines et l'environnement afin d'améliorer la sécurité et la productivité sur les sites miniers. Ainsi, il permettra à celles-ci, une meilleure gestion de la flotte souterraine de la mine avec un meilleur cout convenable.

## II. ANALYSE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE LA PRODUCTIVITE DES ENGINS DE CHARGEMENT ET DE TRANSPORT

L'optimisation des paramètres de chargement et de transport, consiste à étudier profondément ces derniers en effectuant plusieurs essais sur le terrain et en les combinant avec des calculs bien précis, afin d'avoir des résultats, qui peuvent donner après leurs interprétations, une ou plusieurs solutions optimales.

Dans cet article, nous analyserons les paramètres de chargement et de transport de la mine souterraine de Yaléa, les matériels de chargements, les matériels de transport et les combinaisons d'engins : et nous allons établir une étude d'optimisation, pour choisir la meilleure solution maximisant ainsi la productivité de la mine.

### 2.1 Chargement

Lorsqu'on aborde ce processus, on doit avoir à l'esprit qu'il faut réduire au maximum le temps d'immobilisation de l'engin de transport ; donc on doit déterminer avec soin le rapport entre le volume du godet et la charge utile du camion en fonction des conditions locales de chantier. Il en est de même pour les caractéristiques des machines de chargement.

Dans le but d'effectuer une analyse fiable et stratégique sur les engins de chargement afin d'identifier une base d'optimisation, nous étudierons les différents paramètres influençant la productivité de ces engins.

#### 2.1.1 Coefficient de remplissage du godet de la chargeuse

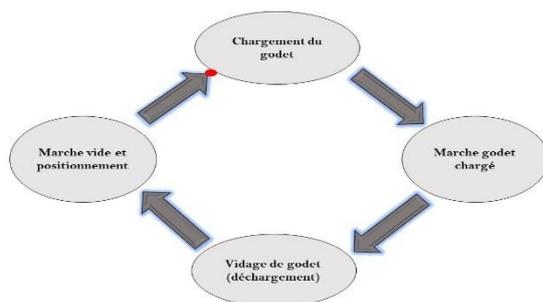
Le coefficient de remplissage est un facteur important permettant d'avoir une idée sur le tonnage que contient le godet de la chargeuse. Il s'articule autour de **0,85**.

#### 2.1.2 Temps de cycle de la chargeuse

Le temps de cycle de l'engin de chargement comprend 4 phases : (Amir, 2017)

- Chargement du godet ;
- Marche godet chargé ;
- Vidage de godet (déchargement) ;
- Marche vide et positionnement pour charger le godet suivant.

Figure 1 : temps de cycle de chargement



**Source** : Figure générée par l'auteur

Le temps de cycle d'une chargeuse est déterminé par la relation suivante :

$$T_c = T_{ch} + T_{march} + T_{déch} + T_{mav}$$

**Equation 01** : temps de cycle de chargeuse

Où :

- $T_{ch}$  : Durée de chargement du godet ;
- $T_{march}$  : Durée de parcours de chargeuse chargée vers l'engin ;
- $T_{déch}$  : Durée de déchargement du godet ;
- $T_{mav}$  : La durée de parcours à vide vers le lieu de chargement.

Nous effectuerons une étude de moyenne des données du temps cycle qui sont les suivants.

Pour plus de précision, nous prenons particulièrement de méthode par méthode afin d'effectuer une analyse fiable sur les temps de cycle des engins de chargement.

### 2.1.2.1 La méthode de chargement simple (Free bogging)

Cette méthode est utilisée avant la limite de la zone de sécurité de la chambre d'abattage que nous utilisons pour alimenter l'espace de stock de minerais ou pour charger les camions.

La moyenne est calculée par la formule :

$$\text{Moyenne (M)} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^n T_{Ci}$$

**Equation 02** : la moyenne

**Tableau1** : temps de cycle de chargement simple

N° du cycle	Temps de cycle	N° du cycle	Temps de cycle
1	00:04:45	21	00:02:16
2	00:05:53	22	00:03:09
3	00:04:12	23	00:05:36
4	00:03:04	24	00:03:04
5	00:02:29	25	00:03:16
6	00:02:35	26	00:03:06
7	00:08:09	27	00:03:22
8	00:07:59	28	00:05:32
9	00:07:24	29	00:02:57
10	00:06:17	30	00:02:58
11	00:05:01	31	00:02:49
12	00:07:01	32	00:03:36
13	00:04:28	33	00:03:43
14	00:02:40	34	00:04:25
15	00:02:25	35	00:06:47
16	00:02:59	36	<b>00:06:27</b>
17	00:05:04	37	00:05:56
18	00:02:44	38	<b>00:04:03</b>
19	00:03:19	39	00:03:06
20	00:03:42	40	<b>00:03:22</b>
Moyenne			00:04:18

*Source* : Généré par l'auteur

La moyenne des temps de cycle obtenus par cette méthode est **4mn18sec**

$T_{moyen} = 258$  secondes

### ➤ Rendement de la méthode

On calcule d'abord la production théorique de la chargeuse, elle est définie par un nombre de cycles théoriques de base par heure obtenu lors de notre analyse sur le terrain.

Elle est calculée par la relation suivante :

$$P_{th} = N \times G ; (t/h) \text{ m}^3 \text{ par heure}$$

**Equation 03** : production théorique de la chargeuse exprimée en tonnes par heure (t/h)

- $P_{th/h}$  : production théorique de la chargeuse exprimée en tonnes par heure (t/h) ;
- $N$  : nombre de cycle de base par heure (cycle/h) ;
- $G$  : volume chargé, déplacé ou transporté par cycle exprimé en mètre cube ( $m^3$ ) ;  $G = 8 \text{ m}^3$

**Nombre de cycle de base par heure :**

$$N = \frac{3600}{258} = 14 \text{ cycle /h}$$

$$P_{th/h} = N \times G = 14 \times 8 = 112 \text{ m}^3/\text{h}$$

La masse volumique du minerai exploité est  $1,93 \text{ t/m}^3$ .

D'où:

$$P_{th/h} = 112 \times 1,93 = 216,16 \text{ t/h}$$

La production théorique de la chargeuse est alors **216,16 t/h**

La production théorique en tenant compte des facteurs tels que : le coefficient de remplissage et le coefficient d'utilisation de poste :

$$P_{th/h} (C_r \ \& \ U) = P_{th/h} \times U \times C_r$$

**Equation 03** : production instantanée de la chargeuse exprimée en tonnes par heure (t/h)

- $C_r$  : coefficient de remplissage
- $U$  : coefficient d'utilisation du chantier
- $P_{th/h}$  : production théorique de la chargeuse exprimée en tonnes par heure (t/h) ;

$$P_{th/h} (C_r \ \& \ U) = P_{th/h} \times U \times C_r$$

$$P_{th/h} (C \ \& \ U) = 216,16 \times 0,85 \times 0,95 = 165,36 \text{ t/h}$$

$$P_{th/h} (C_r \ \& \ U) = 165,36 \text{ t/h}$$

La production instantanée en tenant compte du coefficient de remplissage et de l'utilisation du chantier est **165,36 t/h**

#### 2.1.2.2 La méthode Teleremote

Cette méthode est utilisée par un système d'opération à distance sans qu'il y ait aucun opérateur dans l'équipement après la limite de la zone de sécurité de la chambre d'abattage que nous utilisons pour alimenter l'espace de stock de minerais ou pour charger les camions.

**Tableau 2 :** temps de cycle de TELEREMOTE

N° du cycle	Temps de cycle	N° du cycle2	Temps de cycle2	N° du cycle3	Temps de cycle3
1	00:06:24	21	00:06:43	41	00:04:05
2	00:09:03	22	00:06:27	42	00:08:14
3	01:09:16	23	00:05:15	43	00:07:55
4	00:07:33	24	00:05:52	44	00:08:09
5	00:15:51	25	00:06:14	45	00:07:59
6	00:06:21	26	00:06:05	46	00:07:24
7	00:07:42	27	00:05:48	47	00:06:17
8	00:06:36	28	00:05:47	48	00:05:01
9	00:09:46	29	00:06:16	49	00:07:01
10	00:06:27	30	00:05:53	50	00:05:34
11	00:07:56	31	00:05:32	51	00:05:15
12	00:06:47	32	00:05:01	52	00:05:25
13	00:06:45	33	00:05:56	53	00:05:08
14	00:09:21	34	00:04:46	54	00:06:04
15	00:09:59	35	00:06:01	55	00:07:38
16	00:09:38	36	00:05:42	56	00:05:50
17	00:07:17	37	00:04:59	57	00:08:06
18	00:08:27	38	00:06:26	58	00:06:29
19	00:06:05	39	00:05:50	59	00:05:14
20	00:07:27	40	00:05:23	60	00:05:48
Moyenne					00:07:49

Source : Généré par l'auteur

**La moyenne des temps de cycle obtenus par cette méthode est 7 min 49 sec**

**T<sub>moyen</sub> = 469 secondes**

➤ **Rendement de TELE REMOTE**

**Nombre de cycle de base par heure :**

$$N = \frac{3600}{469} = 8 \text{ cycle/h}$$

$$P_{th/h} = N \times G = 8 \times 8 = 64 \text{ m}^3/\text{h}$$

La masse volumique du minerai exploité est 1,93 t/m<sup>3</sup>.

$$P_{th/h} = 64 \times 1,93 = 123,52 \text{ t/h}$$

La production théorique de la chargeuse est alors 123,52 t/h.

La production théorique en tenant compte des facteurs tel que : le coefficient de remplissage et de l'utilisation du chantier :

$$P_{th/h} (C_r \ \& \ U) = P_{th/h} \times U \times C_r$$

$$P_{th/h} (\text{coef utilisation \ \& \ remplissage}) = 123,52 \times 0,85 \times 0,90 = 94,49 \text{ t/h}$$

La production théorique en tenant compte du coefficient de remplissage et de l'utilisation du chantier est **94,49 t/h**

### 2.1.2.3 Chargement des camions (Bog to truck)

**Tableau 3** : temps de cycle de chargement des camions

Moyenne					00:02:10
---------	--	--	--	--	----------

*Source* : Généré par l'auteur

La moyenne des temps de cycle obtenus par cette méthode est **2 min10 sec**

$T_{\text{moyen}} = 130$  secondes

➤ **Rendement du stockpile au camion (Bog to truck)**

**Nombre de cycle de base par heure :**

$$N = \frac{3600}{130} = 27 \text{ cycle /h}$$

$P_{\text{th/h}} = N \times G = 27 \times 8 = 216 \text{ m}^3/\text{h}$

La masse volumique du minerai exploité est  $1,93 \text{ t/m}^3$ .

$P_{\text{th/h}} = 216 \times 1,93 = 416,88 \text{ t/h}$

La production théorique de la chargeuse est alors **416,88 t/h**

La production théorique en tenant compte des facteurs tel que : le coefficient de remplissage :

$P_{\text{th/h}} (C_r \ \& \ U) = P_{\text{th/h}} \times U \times C_r$

$P_{\text{th/h}} (C_r \ \& \ U) = 416,88 \times 0,85 \times 0,90 = 318,92 \text{ t/h}$

La production théorique en tenant compte du coefficient de remplissage est **318,92 t/h**.

Sachant que le facteur de charge du camion est **46 tonnes** ;

Le nombre de camions qui sont apte à être chargés par une chargeuse est :

**7 camion/heure**

La durée de ces cycles est une donnée constructrice. Son estimation met en jeu un grand nombre de paramètres, dont :

- Facteurs liés à la machine et à son équipement :
  - Volume du godet (mauvais remplissage du godet)
  - Problème mécanique (break down) ;
  - Manœuvrabilité de la chargeuse ;
  - La disponibilité de la machine
- Facteurs extérieurs de la machine :
  - Nature et granulométrie des matériaux ;

**Figure 2 :** Gros blocs de roche



**Source :** *Prise par l'auteur*

- Etat de la route

**Figure 3 :** Etat de la route



**Source :** *Prise par l'auteur*

- Organisation stratégique du travail ;
- Qualification de l'opérateur.

Des facteurs liés à la machine résultent un temps de cycle de base, caractéristique de la machine, qui est fourni par le constructeur. Ce temps de base peut ensuite être modulé en fonction des facteurs que nous avons appelés « extérieurs ». Il s'avère cependant très difficile, voire impossible, d'obtenir des statistiques complètes et précises sur les temps de cycle.

En fait, chaque machine est différente, et seul le constructeur, ou des essais sur le site, peuvent fournir un temps de cycle précis.

### 2.1.3 Synthèse sur le rendement des chargeuses

Les différents tableaux réalisés ultérieurement aboutissent à la connaissance de valeurs déterminées ci-dessous.

**Tableau 4 :** Synthèse du rendement des chargeuses

Méthode de chargement	Chargement simple	TELE REMOTE ET MANUEL	
Temps de cycle (min)	00:02:10	00:07:49	00:04:18
Production théorique(t/h)	416,88	123,52	216,16
Production instantanée(t/h)	354,35	104,99	183,74
Nombre de godets par heure	23	19	

**Source :** *Généré par l'auteur*

## 2.2 Transport

### 2.2.1 Temps de cycle

La durée d'un cycle, on dit aussi durée d'une rotation dans le cas d'un engin de roulage, comprend une addition des temps. Certains de ces temps résultent de calcul (temps de roulage), d'autres résultent de chronométrage.

Le temps de cycle d'un camion est déterminé par le chronométrage d'après la formule suivante :

$$TC = T_{mch} + T_{ch} + T_{dch} + T_{rch} + T_{rv} + TM$$

**Equation 04 :** temps de cycle du camion

Où :

- Temps de chargement ( $T_{ch}$ ) (min) ;
- Temps de roulage en charge ( $T_{rch}$ ) (min) ;
- Temps de déversement et manœuvre de vidage ( $T_{dch}$ ) (min) ;
- Temps de roulage à vide ( $T_{rv}$ ) (min).

Dans le but d'effectuer une analyse fiable et stratégique sur les camions de transport afin d'identifier une base d'optimisation, j'ai effectué une étude de moyenne des données obtenues sur le terrain.

Pour plus de précision, nous prenons les niveaux de trajets bien déterminés ;

A chaque niveau, nous avons pris la moyenne de 10 temps de cycle.

Ces niveaux sont les suivants :

- ❖ South 458 à 172
- ❖ South A 458 à 172
- ❖ South LWR DEC à 172
- ❖ South A DECLINE à 172
- ❖ South B DECLINE à 172
- ❖ Centre 633L à 172
- ❖ North 408 à 172
- ❖ North 408 au portail
- ❖ 483 North à 172
- ❖ 533 North à 172

**Tableau 4 :** Synthèse du rendement des chargeuses

	Lieu de chargement (nombre de voyage = 10)	Lieu de déchargement	Temps moyen de 10 cycles
1	South A 458	172L	00:45:37
2	458 South	172L	00:43:43
3	South Lower DDD	172L	00:46:36
4	South A Decline	172L	00:46:33

<b>5</b>	<b>South B Decline</b>	<b>172L</b>	<b>00:47:32</b>
<b>6</b>	<b>Centre 633</b>	<b>172L</b>	<b>00:53:48</b>
<b>7</b>	<b>408 North</b>	<b>172L</b>	<b>00:39:40</b>
<b>8</b>	<b>408 North</b>	<b>Portal</b>	<b>00:55:59</b>
<b>9</b>	<b>533 North</b>	<b>172L</b>	<b>00:48:23</b>
<b>10</b>	<b>483 North</b>	<b>172L</b>	<b>00:43:36</b>
<b>Temps moyen</b>			<b>00:47:09</b>

**Source :** Généré par l'auteur

### 2.2.1.1 Analyse et interprétation du temps de cycle

La moyenne du temps de cycle obtenu aux différents niveaux après les analyses sur le terrain est alors **47 min 09 sec.**

La durée de ces cycles est une donnée constructrice. Son estimation met en jeu un grand nombre de paramètres, dont :

### 2.2.1.2 Facteurs liés à la machine et à son équipement :

- Volume de la benne (mauvais remplissage de la benne du camion)
- Problème mécanique (break down) ;
- La disponibilité et l'utilisation de la machine

### 2.2.1.3 Facteurs extérieurs de la machine :

- Nature et granulométrie des matériaux

Une dilution du minerai par le paste et les granulométries de grande taille ont énormément augmenté le temps de cycle au niveau de 408 North.

**Tableau 5 : Cycle normal**

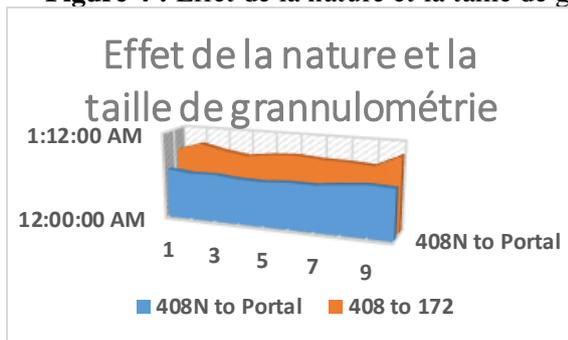
	N° du cycle	Tch	Trch	Tdech	Trv	Temps du cycle
408N to 172	1	00:03:47	00:18:00	00:01:39	00:17:35	00:41:01
	2	00:03:39	00:19:14	00:01:17	00:14:52	00:39:02
	3	00:03:43	00:17:35	00:01:29	00:16:43	00:39:30
	4	00:04:25	00:18:02	00:02:48	00:12:25	00:37:40
	5	00:03:40	00:19:12	00:01:54	00:12:30	00:37:16
	6	00:03:07	00:21:19	00:00:59	00:13:20	00:38:45
	7	00:04:54	00:18:13	00:01:49	00:13:35	00:38:31
	8	00:05:51	00:20:12	00:01:23	00:13:18	00:40:44
	9	00:03:33	00:19:38	00:02:08	00:17:16	00:42:35
	10	00:04:24	00:18:51	00:01:56	00:16:29	00:41:40
408N	Moyenne					00:39:40

**Source :** Généré par l'auteur

**Tableau 6 : Cycle augmente due a la dilution**

	N° du cycle	Tch	Trch	Tdech	Trv	Temps du cycle
408N to Portal	1	00:04:54	00:27:23	00:01:26	00:20:22	00:54:05
	2	00:05:51	00:28:14	00:02:23	00:23:47	01:00:15
	3	00:06:32	00:27:17	00:02:28	00:19:31	00:55:48
	4	00:06:47	00:23:51	00:00:55	00:21:16	00:52:49
	5	00:04:36	00:25:32	00:01:16	00:24:01	00:55:25
	6	00:04:57	00:29:14	00:00:53	00:21:24	00:56:28
	7	00:04:43	00:24:36	00:01:44	00:23:45	00:54:48
	8	00:05:19	00:27:56	00:01:12	00:19:56	00:54:23
	9	00:03:28	00:29:45	00:02:14	00:17:33	00:53:00
	10	00:03:21	00:33:39	00:01:33	00:24:21	01:02:54
408N	Moyenne					00:55:59

Source : Généré par l'auteur

**Figure 4 : Effet de la nature et la taille de granulométrie**

Source : Générée par l'auteur

- Etat de la route ;
- Organisation stratégique du travail ;
- Temps d'attente ;
- Qualification de l'opérateur.

Des facteurs liés à la machine résultent en temps de cycle de base, caractéristique de la machine, qui est fourni par le constructeur. Ce temps de base peut ensuite être modulé en fonction des facteurs que nous avons appelés « extérieurs ». Il s'avère cependant très difficile, voire impossible, d'obtenir des statistiques complètes et précises sur les temps de cycle.

En fait, chaque machine est différente, et seul le constructeur, ou des essais sur le site, peuvent fournir un temps de cycle précis.

### 2.2.2 Rendement des camions

Ici nous calculons la production théorique du camion, elle est définie par un nombre de cycles théoriques de base par heure obtenu lors de notre analyse sur le terrain.

Elle est calculée par la relation suivante :

$P_{th} = N \times G$  ; (t/h) tonnes par heure

- $P_{th/h}$  : production théorique du camion exprimée en tonnes par heure (t/h) ;
- $N$  : nombre de cycle de base par heure (cycle/h) ;
- $G$  : charge déplacée ou transportée par cycle exprimé en tonnes ;  $G = 46$  t

Nombre de cycle de base par heure :

$$N = \frac{3600}{2829} = 1,27 \text{ cycle /h}$$

$P_{th/h} = N \times G = 1,27 \times 46 = 58,42$  t/h

La production théorique du camion est alors **58,42 t/h**.

Le temps de cycle moyen d'un camion est de 47min 09sec ~ 47min ; en optimisant ce qui doit correspondre à 11,42 cycles sensiblement égaux à 11 cycles sur une poste de 09h qui est non atteint due à :

- Problème d'organisation (mauvaise gestion de la flotte)
- Problème mécanique

Nous avons effectué un calcul du tonnage en fonction de la production théorique, de différents nombres de camion par poste et avec une période de travail de 9 heure.

**Tableau 7 : Simulation numérique du rendement**

Nombre du camion	Heure du shift	Pth par heure	Tonnage (t)
1	9	58,42	525,78
2	9	58,42	1051,56
3	9	58,42	1577,34
4	9	58,42	2103,12
5	9	58,42	2628,9
6	9	58,42	3154,68

*Source : Généré par l'auteur*

Cela nous montre qu'avec 6 camions utilisés, nous sommes aptes à effectuer un tonnage de **3 154,68 tonnes** par une équipe de **9 heures** de travail si seulement si les arrêts due aux pannes et organisations de la flotte sont limités.

### III. LES FACTEURS INFUANCANT LA PRODUCTIVITE DES ENGINS DE CHARGEMENT ET DE TRANSPORT

#### 3.1 Disponibilité

La disponibilité des engins de chargement est la durée à laquelle ces machines sont aptes à effectuer ses taches à son état.

Elle est obtenue en calculant le taux de disponibilité.

##### 3.1.1 Taux de disponibilité

Le taux de disponibilité se calcule par la soustraction des heures de pannes et des services le tout divisé par les heures de disponibilité.

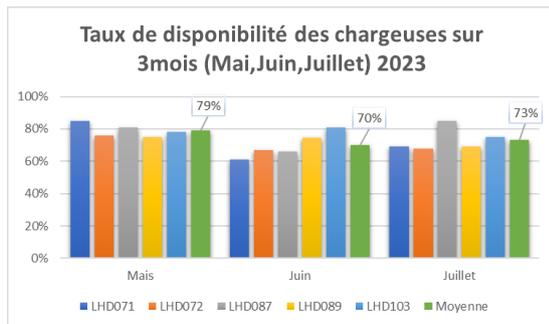
$$D = \frac{24 - (\text{panne} + \text{service})}{24} \times 100$$

**Equation 05 :** Taux de disponibilité

(Ici l'heure de travail est 24h/24)

Où

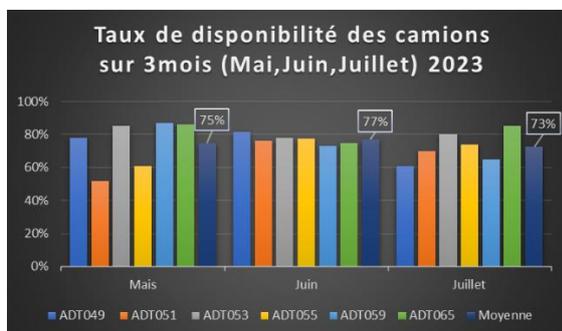
$$D = \frac{\text{Temps total} - \text{Temps total d'arrêt de maintenance}}{\text{Temps total}} \times 100$$

**Figure 5 :** le taux de disponibilité des chargeuses sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023

Source : Générée par l'auteur

#### ❖ Interprétation :

Les chargeuses ont un taux de disponibilité moyen de 74% <75% donc il risque d'y avoir de problème de disponibilité sur cette période. La plus disponible sur les 3mois est LHD103 qui est une nouvelle chargeuse ; celle avec la plus petite valeur est le LHD072 avec 71.48%.

**Figure 6 :** le taux de disponibilité des camions sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023

Source : Générée par l'auteur

#### ❖ Interprétation :

En moyenne, les camions ont 75.00%. Le pourcentage le plus élevé est obtenu par l'ADT065 avec 81.16%. La moins disponible est l'ADT051 avec 66.00%.

### 3.1.3 Comparaison entre la disponibilité des chargeuses et des camions

En comparant la disponibilité des chargeuses et des camions nous remarquons que les camions sont plus disponibles.

**Remarque :** les camions avec un taux de disponibilité élevé que les chargeuses expliquant en réalité les raisons des longues files d'attentes au niveau du chargement. Pour une amélioration il faut :

- ✓ Une répartition optimale des chargeuses
- ✓ Une bonne organisation des changements de localisations (dispatching)
- ✓ Une bonne utilisation des chargeuses durant l'opération pour éviter les différentes pannes.

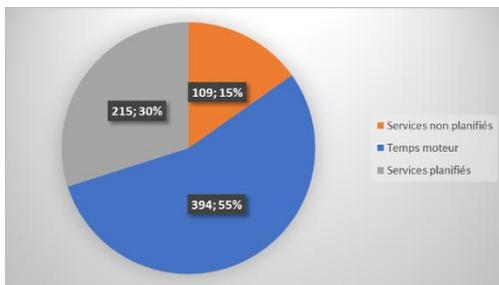
La valeur de ce taux dépend de la durée des maintenances d'où il serait possible d'évaluer et de comparer l'efficacité des services de maintenances.

De ce fait on a différents types d'entretien effectués sur les machines par le département de maintenance pour obtenir au maximum les machines disponibles.

### 3.1.2 Types de maintenance

- **Service journalier** : s'effectue une fois par poste avec une durée d'une (1) heure d'où un total de 2heures par jour. Il est constitué par des étapes qui sont : Le graissage des équipements (vérification de leurs niveaux d'eau et d'huile) et une inspection pour repérer d'éventuelles pannes qui au fur et à mesure pourraient s'aggraver.
- **Service hebdomadaire** : les filtres sont changés ainsi que les pièces défectueuses et les pannes détectées au cours des services journaliers sont fixés.
- **Service lié aux heures du compteur des équipements** : Il se fait à chaque 250 heures ; la vidange est effectuée, tous les filtres sont changés. Les soupapes sont réglées en plus des autres services habituels le turbo, les injecteurs, la pompe à eau, l'alternateur, le démarreur pompe à huile, le thermostat, les câbles électriques des injecteurs sont remplacés.

**Figure 7 :** Effet de service non planifié



Source : Générée par l'auteur

### 3.2 Utilisation de la disponibilité

A Yaléa, nous essayons de développer un système doté d'une technologie (Newtrax : système qui, à l'aide duquel des informations émises par les machines et le personnel sont reçues en temps réel) ; nous pouvons définir le taux d'utilisation étant le rapport entre les heures de marches du moteur recueillis sur le compteur de la machine et le temps de disponibilité. Sur le compteur on a deux types d'heures :

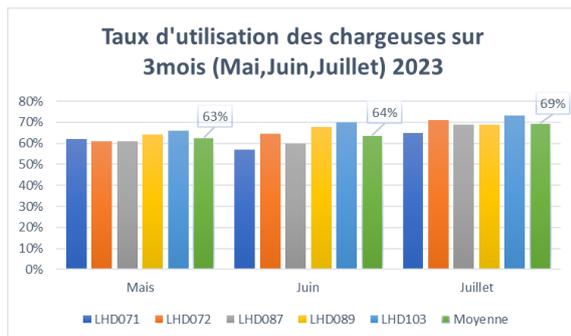
**Les heures de marche du moteur (engine hours)** : c'est le nombre d'heure pendant lequel le moteur de la machine est en marche.

**Les heures de transmission (transmission hours)** : c'est le nombre d'heure pendant lequel la machine est en déplacement.

$$U = \frac{24 - [\text{Temps}(\text{pannes} + \text{services} + \text{standby} + \text{rentré après le tir})]}{24 - (\text{pannes} + \text{services})}$$

**Equation 06 :** Utilisation de la disponibilité

**Figure 7 :** le taux d'utilisation des chargeuses sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023



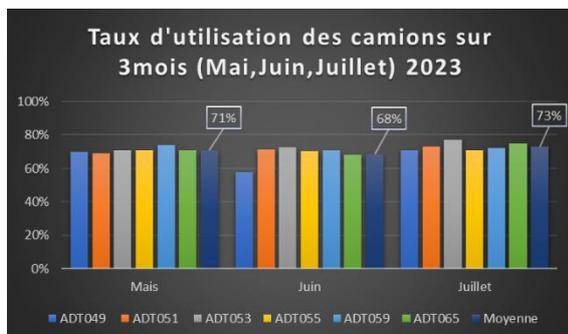
Source : Générée par l'auteur

❖ **Interprétation :**

Avec un taux moyen de 65.33% d'utilisation sur les trois mois (Mai, Juin, Juillet) ; en moyenne les chargeuses n'ont pas atteint l'objectif fixé qui est 74%. La chargeuse LHD103 est la plus utilisée ; le LHD087 a la plus petite valeur.

**Remarque :** en comparant le taux de disponibilité par rapport au taux d'utilisation nous pouvons dire que les chargeuses sont disponibles mais non utilisées c'est-à-dire qu'il y'a un problème d'utilisation des machines à YALEA.

**Figure 8 :** le taux d'utilisation des camions sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023



Source : Générée par l'auteur

❖ **Interprétation :**

Le camion ADT053 a la plus grande valeur moyenne d'utilisation sur les 3mois ; et le moins utilisé est l'ADTV049. Le mois de juin est très défavorable sur les autres mois.

**3.3 Efficience**

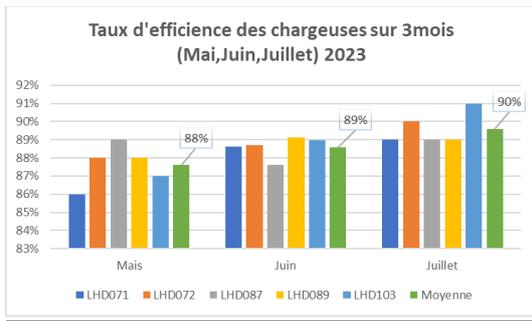
Elle prend compte de l'efficacité du fonctionnement de la machine et de l'efficacité de de la gestion des travaux. L'efficience du fonctionnement de l'équipement est déterminée par la capacité à laquelle il fonctionne par rapport à sa capacité nominale.

Le taux d'efficience se calcule par la formule suivante est :

$$E = \frac{\text{Temps moteur} - \text{temps perdus au cours de l'opération(idle)}}{\text{Temps moteur}}$$

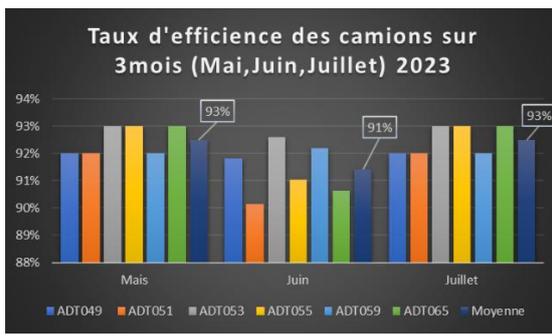
**Equation 07 :** Efficience

**Figure 9 :** le taux d'efficience des chargeuses sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023



Source : Générée par l'auteur

**Figure 10 :** le taux d'efficience des camions sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023



Source : Générée par l'auteur

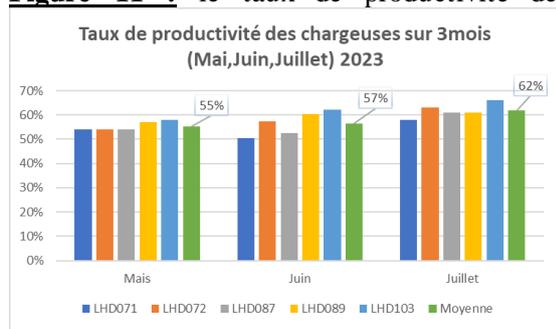
### 3.4 Productivité

La productivité traduit la qualité et même la quantité du travail effectué. Il est le produit du facteur d'utilisation par l'efficacité.

$$\text{Productivité} = \text{Utilisation} \times \text{Efficience}$$

**Equation 08 :** Productivité

**Figure 11 :** le taux de productivité des chargeuses sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023

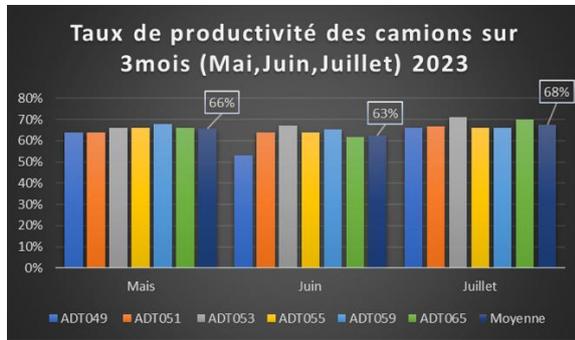


Source : Générée par l'auteur

### ❖ Interprétation :

Le graphe ci-dessus montre qu'en moyenne aucune chargeuse n'a pu atteindre l'objectif fixé sur les 3 mois (Mai à Juillet). La plus grande valeur est obtenue par le LHD103, et la moins productive est le LHD071.

**Figure 12 :** le taux de productivité des camions sur 3mois (Mai, Juin, Juillet) 2023



*Source : Générée par l'auteur*

## IV. ANALYSE MINUTIEUSE DU PROTOTYPE ÉLECTRONIQUE

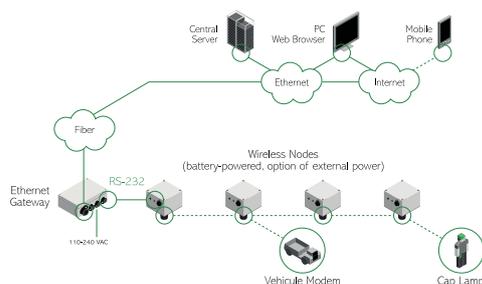
La technologie *Newtrax* est une plateforme innovante utilisée principalement dans le secteur minier pour améliorer la gestion des opérations souterraines.

Ce prototype *Newtrax* se spécialise dans la collecte de données en temps réel à partir d'équipements et de véhicules miniers, ainsi que dans l'analyse de ces données pour optimiser la productivité, la sécurité et l'efficacité opérationnelle.

### 4.1 Collecte de Données en Temps Réel

Ce prototype utilise des capteurs et des systèmes de nœuds embarqués pour collecter des données précises sur divers aspects des opérations minières, comme la localisation des véhicules, les conditions environnementales et l'état des équipements.

**Figure 13 :** Schéma de simulation d'installation

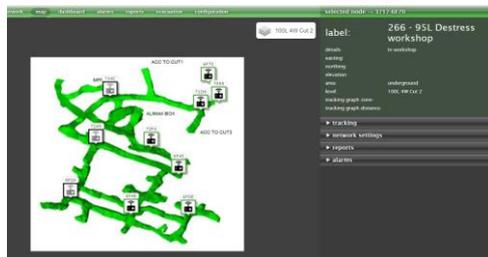


*Source : OptiMine® Mining Data Platform (Platform, s.d.)*

- Gestion de Flotte et Localisation :

Ce prototype permet une gestion efficace des flottes de véhicules et d'équipements miniers grâce à la localisation en temps réel. Cela facilite la coordination des activités et optimise l'utilisation des ressources.

**Figure 14 :** Interface d'écran de contrôle du prototype

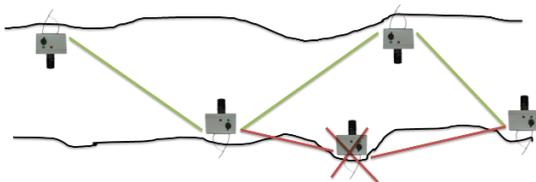


*Source : OptiMine® Mining Data Platform (Platform, s.d.)*

## 4.2 Surveillance et Sécurité

La plateforme permet une surveillance continue des conditions de travail, ce qui aide à prévenir les accidents et à améliorer la sécurité des travailleurs. Les alertes en temps réel permettent une réponse rapide en cas d'incidents.

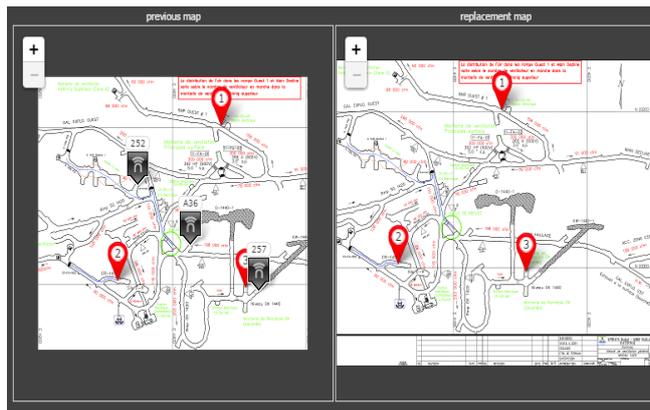
**Figure 15 :** Disposition des nœuds pour la bonne réception des informations



*Source : OptiMine® Mining Data Platform (Platform, s.d.)*

## 4.3 Optimisation des Opérations

En analysant les données recueillies, le prototype offre des idées précieuses pour optimiser les flux de travail, réduire les temps d'arrêt non planifiés et améliorer l'utilisation des équipements et des ressources.

**Figure 16 :** Localisation en temps réel pour éviter les arrêts inutiles

*Source : OptiMine® Mining Data Platform (Platform, s.d.)*

En résumé, ce prototype représente une avancée significative dans la modernisation et l'efficacité des opérations minières souterraines, en utilisant des technologies de pointe pour transformer la manière dont les mines sont gérées et exploitées. Puis cet article invite vivement la recherche locale du développement de ce prototype afin de répondre aux challenges industriels africains des mines.

## V. OPTIMISATION

Après les différentes analyses ainsi que des calculs ; pour une optimisation du chargement et du transport de la mine souterraine de YALEA, il faut :

- Optimisation suivant la réduction du temps de cycle des camions
- Optimisation suivant la réduction du temps de cycle de la chargeuse
- Optimisation suivant la productivité effective des camions

### 5.1 Optimisation suivant la réduction du temps de cycle des camions

Pour cela il faut une réduction des files d'attente au chargement.

Un camion est un engin qui fait partie d'une chaîne de production. Sa productivité est dépendante de ou des engins de chargement qui le desservent, d'où l'appellation "desserte" qui sert à qualifier un ensemble chargement / camion. Par ailleurs on remarque que cette desserte est discontinue. C'est ainsi qu'à un certain moment on observe qu'il y a un ou plusieurs camions en attente derrière l'engin de chargement. Ainsi, dans la mine souterraine de YALEA, il faut la réduction du temps d'attente pour le chargement qui est entre (25 - 30 minutes) par poste.

### 5.2 Optimisation suivant la réduction du temps de cycle de la chargeuse

Avec un temps de cycle 130s (cas chargement simple sachant que le stockpile est rempli et le front non loin) ce qui donne un temps de chargement d'un camion de 6min30s. Une réduction de ce temps de cycle de la chargeuse à 90s nous donne 4min30s pour charger un camion d'où la diminution du temps de cycle de ce dernier de 47min à 45min.

### 5.3 Optimisation suivant la productivité des camions

Pour cela il faut :

- ✓ Un bon remplissage des camions d'où l'augmentation du facteur de remplissage des camions ;
- ✓ La disponibilité des chargeuses à 85% au lieu de 75% (ce qui est planifié) ; En effet mes calculs en considérant les données recueillies sur le terrain et en prenant une disponibilité de 85% ; nous donne :

**Tableau 8** : Simulation numérique du rendement

La productivité en prenant 85% de disponibilité des chargeuses par poste (24h)	La productivité planifiée de la mine avec 75% de disponibilité des chargeuses par poste (24h)
<b>1577,34 t/poste</b>	<b>1158,48 t/poste</b>

### CONCLUSION

Après les analyses et calculs des paramètres de chargement et de transport, on constate qu'il est possible de les optimiser dans le but d'augmenter la production de la mine, vu que les chargeuses peuvent assurer évidemment un rendement effectif qui dépasse le tonnage mensuel planifié, et que seulement cinq camions sont suffisamment aptes pour couvrir les besoins du site alors que la mine souterraine de Yaléa bénéficie de six camions dans sa flotte.

La solution la plus adéquate, pour l'optimisation des paramètres de chargement et de transport de la mine souterraine de Yaléa, afin de maximiser la productivité avec des coûts moindre, est la combinaison d'une seule chargeuse et de trois camions : cette combinaison permet d'augmenter la production annuelle pour atteindre une productivité de **1 535 277,6 tonnes par an**.

Cela est évidemment effectué si seulement si :

- ✓ Une diminution des pertes de temps inutiles ;
- ✓ Minimiser les pannes répétitives ;
- ✓ Une augmentation du taux de productivité et de facteur de remplissage de ces engins ;
- ✓ Des opérateurs expérimentés.

### REMERCIEMENTS

Nous tenons vivement à remercier MSAS et la bibliothèque nationale pour leur engagement sans faille de la promotion et de l'évolution de la recherche en Afrique particulièrement au Mali.

Ensuite, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes encadreurs et co-auteurs Dr Ing Moussa THIAM et Massire SYLLA pour leur soutien inébranlable, leurs conseils éclairés et leur expertise précieuse tout au long de cet article. Leur patience et leur disponibilité m'ont grandement aidé à naviguer à travers les défis et les complexités de cette étude.

## REFERENCES

- Aloui, F. (2022). Simulation-based Optimization of Underground Haulage Systems. *ScienceDirect*.
- Amir, B. I. (2017). Optimisation des paramètres de chargement et de transport de la carrière de Djebel Safia pour augmenter la production annuelle. *SCRIBD*.
- Ash, R. L., B.R. , L., & T.V., F. (1989). Optimization of Truck-Loader Haulage Systems in Underground Mining. *CIM Bulletin*, 82(921), 77-82.
- Ben-Awuah, E., & Yashar, P. (2023). Optimization of Truck-Loader Matching Based on Simulation Method for Underground Mines. *Sustainability Journal, MDPI*.
- Brown, A. (2019). Reliability Engineering in Underground Mining Equipment. *SpringerLink*.
- Dhillon, B. S. (2019). *SpringerLink*.
- Hebblewhite, B. (2020). Automation in Underground Mining: Opportunities and Challenges. *SpringerLink*.
- Liu, H. (2022). Simulation-Driven Optimization in Chinese Underground Mines. *MDPI*.
- Palamgio, T., M.D.A Thomas, & S.E, P. (1995). Integrated Mine Planning and Haulage System Optimization. *CIM Bulletin*, 88(992), 95-100.
- Platform, O. M. (s.d.). *Newtrax - Underground Mining Technology*. (Newtrax) Récupéré sur newtrax.com
- Pourrahimian, Y. (2023). Intelligent Mining Systems: Applications and Benefits. *MDPI Sustainability*.
- Pourrahimian, Y., & Eugene , B.-A. (2023). Recent Advances in Underground Mine Planning and Scheduling. *MDPI Mining*.
- Report, V. M. (2020). *International Journal of Mining Science and Technology*.
- ZHANG, X. (2021). Data-Driven Optimization of Mining Equipment Performance . *Journal of Cleaner Production*.