



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Faculté des Sciences de la terre et de l'univers

Université d'Oran 2

Département Des Sciences de la terre

Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Master2

Option : Ressources Minérales Géomatériaux et Environnement

Thème :

**Optimisation de la performance de la flotte de transport
utilisée dans la mine de Kinross Tasiast.**

Présenté par : Hamoud Ely Sabe

Devant le jury composé de :

Présidente	Mme ALLAMI Fatima Zohra	MAA	Oran 2
Encadreur	M. Tabeliouna Mohammed	Professeur	Oran 2
Examineur	M. Benramdane Hocine	MAA	Oran 2

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicace

À mes chers parents, amis et proches

En cette occasion spéciale, je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon amour envers vous.

Votre soutien indéfectible et votre présence ont été des éléments essentiels de mon parcours.

Aujourd'hui, je célèbre cette réussite avec vous, car elle est le fruit de notre union et de notre affection partagée.

À ma famille bien-aimée, merci pour votre soutien inconditionnel et vos encouragements constants. Vous êtes ma source de force et de bonheur, et je vous suis reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes amis précieux, merci d'avoir enrichi chaque instant de cette aventure avec votre amitié sincère et votre soutien indéfectible. Vos rires, vos conseils et vos souvenirs resteront gravés dans mon cœur pour toujours.

Cette réussite est le reflet de notre lien profond et de notre amour mutuel. Je vous dédie ce succès avec tout mon cœur et je vous remercie infiniment pour votre présence dans ma vie.

Avec toute ma gratitude et mon affection,

Remerciements

Je commence par rendre grâce à Dieu, le Tout-Puissant, le Créateur de toutes choses, pour les nombreuses bénédictions qu'Il m'a accordées tout au long de ce voyage. Sa grâce et Sa miséricorde ont été la lumière qui a illuminé mon chemin et la force qui m'a soutenu dans les moments de doute et de difficulté.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers l'Université d'Oran 2 pour m'avoir offert l'opportunité de poursuivre mes études et d'atteindre de nouveaux sommets académiques. Leurs enseignements et leur encadrement ont été d'une valeur inestimable pour moi, et je suis reconnaissant pour leur engagement envers l'excellence académique.

Je remercie également l'Université de Nouakchott pour son rôle crucial dans ma formation lors de ma licence. Les compétences et les connaissances acquises là-bas ont été fondamentales pour mon développement académique ultérieur.

Un grand merci également à la société Kinross Tasiast pour m'avoir offert l'opportunité de stage. Cette expérience pratique a été extrêmement précieuse pour moi, et j'ai beaucoup appris grâce à l'encadrement et aux conseils précieux des ingénieurs et des superviseurs sur place, notamment **Ahlam SHAH** et **Ghoutoub MOHAMED KOUM**.

Je n'oublierai jamais les efforts et le dévouement de ces ingénieurs qui m'ont guidé et soutenu tout au long de mon stage. Leur mentorat m'a permis de mieux comprendre le monde professionnel et a renforcé ma passion pour mon domaine d'études.

Je voudrais également exprimer ma gratitude envers le coordinateur de division à l'Université d'Oran 2, **Pr.M. Tabeliouna**. Sa guidance et son soutien constant ont été d'une aide précieuse tout au long de mon parcours académique.

Enfin, un grand merci à tous mes professeurs à l'Université d'Oran 2. Leurs connaissances, leur passion et leur dévouement à l'enseignement ont été une source d'inspiration pour moi, et je suis reconnaissant pour les nombreuses leçons apprises sous leur tutelle.

Je suis profondément reconnaissant envers chacune de ces personnes et institutions pour leur soutien et leur mentorat. Leurs contributions ont joué un rôle déterminant dans mon parcours, et je serai éternellement reconnaissant.

Avec mes sincères remerciements et mes meilleurs vœux,

Résumé

La méthode de transport la plus couramment utilisée dans les exploitations à ciel ouvert est le transport par camions. Pour maximiser l'efficacité de la flotte de camions et éviter les temps d'arrêt des pelles, il est crucial d'utiliser les camions afin d'optimiser leur capacité de chargement.

Dans la mine de Tasiast en Mauritanie, depuis le début de l'année 2023, plus de 12 347 heures ont été enregistrées pendant lesquelles la flotte de camions utilisée dans la mine était en utilisation mais sans production. De plus, une diminution moyenne de 4 % de l'utilisation de la flotte a été enregistrée, entraînant une perte financière de plus de 1,5 million de dollars. Une variation incontrôlée de la productivité a également été observée, avec des cas de surcharge et de sous-charge des camions.

L'analyse de plus de 125 166 cycles effectués par l'ensemble de la flotte de camions a permis d'identifier les facteurs essentiels qui affectent les performances de la flotte et de quantifier les pertes dues à ces facteurs.

Les recommandations proposées visent à optimiser l'utilisation et la productivité de la flotte tout en améliorant sa durabilité, le tout en maintenant un coût de transport efficace pour l'entreprise.

Mots clés : Mine de Tasiast, Productivité des camions, Transport minier, Optimisation de flotte, Gestion des délais, Coûts de transport, Caterpillar 793D, Temps de cycle, Système de surveillance et de gestion.

ملخص

طريقة النقل الأكثر شيوعاً المستخدمة في التعدين السطحي هي نقل الحمولة عن طريق الشاحنات. من أجل زيادة كفاءة أسطول الشاحنات المستخدم وتجنب توقف الحفارات، من المهم استخدام الشاحنات بأفضل طريقة ممكنة لتحميلها بالكامل بأكبر حمولة ممكنة وبأقل عدد من الرحلات دون التسبب في أي أعطال للشاحنات ذاتها. في منجم تاسياست في موريتانيا، تم تسجيل أكثر من 12,347 ساعة منذ بداية عام 2023، حيث كان أسطول الشاحنات المستخدم في المنجم قيد الاستخدام ولكن بدون إنتاج. بالإضافة إلى ذلك، تم تسجيل انخفاض متوسط بنسبة 4% في استخدام الأسطول، مما تسبب في خسارة مالية تزيد عن 1.5 مليون دولار. كما لوحظ تباين غير منظم في الإنتاجية، مع حالات زيادة الحمولة وتقليلها في الشاحنات. تحليل أكثر من 125,166 دورة أجزاها الأسطول بالكامل سمح بتحديد العوامل الأساسية التي تؤثر في أداء الأسطول. وقياس الخسائر الناجمة عن هذه العوامل تهدف التوصيات المقترحة إلى تحسين استخدام وإنتاجية الأسطول مع تحسين متانته، مع الحفاظ على تكلفة النقل الفعالة للشركة.

الكلمات المفتاحية: منجم تاسياست، إنتاجية الشاحنات، النقل التعديني، تحسين الأسطول، إدارة التأخير، تكاليف النقل، وقت الدورة، نظام المراقبة والإدارة

Abstract

The most commonly used transportation method in open-pit mining is haul truck transportation. To maximize the efficiency of the haul truck fleet and avoid shovel downtime, it is crucial to use the haul trucks optimally and fully utilize their carrying capacity.

In the Tasiast mine in Mauritania, since the beginning of 2023, over 12,347 hours have been recorded during which the haul truck fleet used in the mine was in operation but without production. Additionally, an average decrease of 4% in fleet Utilisation has been recorded, resulting in a financial loss of over \$1.5 million. Uncontrolled variation in productivity has also been observed, with cases of haul truck overloading and underloading.

The analysis of over 125,166 cycles performed by the entire haul truck fleet has identified the key factors that affect fleet performance and quantified the losses resulting from these factors. The proposed recommendations aim to optimize the Utilisation and productivity of the fleet while improving its sustainability, all while maintaining an efficient transportation cost for the company.

Keywords: Mine of Tasiast, productivity of cameras, transport minier, optimization of the slot, delivery services, transport coats, Caterpillar 793D, cycle temperatures, surveillance system and management.

Listes des Figures

<i>Figure1 :Représentation simplifiée de l'Afrique et de ses quatre cratons précambriens</i>	4
<i>Figure:2Schématisation montrant les grands ensembles géologiques de l'Afrique de l'ouest.</i>	6
<i>Figure 3:Carte géographique de la Mauritanie. Source: Perry-Castaneda Library Map Collection, ...</i>	7
<i>Figure4: Carte des grands ensembles Géologiques en Mauritanie (Jeune Afrique, 1977)</i>	8
<i>Figure5: Bassin de Taoudeni (Source: MPEMI)</i>	9
<i>Figure6: Chaîne des Mauritanides (Source: MPEMI)</i>	10
<i>Figure7: Bassin côtier (Source: MPEMI)</i>	11
<i>Figure8: Unités lithostratigraphiques de la dorsale Réguibat (modifiée d'après Bronner et al, 1992).</i>	16
<i>Figure9 : Carte géologique de la région de Tasiast-Tijirit (carte de Chami)</i>	20
<i>Figure11 : Carte géologique de la région de Chami présentant les différentes ceintures de roches vertes au sein du district de Tasiast (d'après la Source-BRGM 2007).</i>	21
<i>Figure12 :Magnétite en lits massifs faisant 6µm à 12µm de large, observée en lumière réfléchie dans les formations de fer rubané. Section polie. Gx5.</i>	21
<i>Figure13:Section polie typique d'un échantillon des « BIM » (Banded Iron Magnetite) qui montre une alternance régulière entre les niveaux sombres et les niveaux clairs.</i>	21
<i>Figure14: La magnétite, pyrrhotite et d'or dans les formations de fer rubané.</i>	22
<i>Figure15: Pyrite recoupe la magnétite et la chalcopryrite qui semble être tardive</i>	22
<i>Figure16 : Association de chalcopryrite et pyrrhotite.</i>	22
<i>Figure17:Remplissage de fracture par la pyrite dans le faciès basique métamorphisé (amphibolite). Section polie. Gx10.</i>	23
<i>Figure18: Pyrite fracturée, disséminée dans la pyrrhotite dans un quartzite ferrugineux. Section polie. Gx10.</i>	23
<i>Figure19: La chalcopryrite tardive entoure la pyrite de la deuxième génération. Section polie. Gx10</i>	23
<i>Figure20:Les deux générations de pyrite dans une metabasite. Section polie Gx10.</i>	23
<i>Figure21:Pyrite entourée de goethite après une oxydation tardive.</i>	23

<i>Figure22:Pyrite automorphe dans du quartz filonien</i>	23
<i>Figure23:Mispickel ou arsénopyrite observé au microscope en lumière réfléchié sur une section polie. Section polie. Gx10</i>	24
<i>Figure24: Association de pyrrhotite, pyrite et or dans un quartzite ferrugineux. Section polie. Gx10</i>	24
<i>Figure25 : Illustration des différents passages des fluides minéralisateurs à Tasiast</i>	25
<i>Figure26: Coupe verticale synthétique des lithologies de la ceinture d'Aouéouat. (modifiée d'après Bronner et al, 1992)</i>	26
<i>Figure27 : Carte du monde localisant les opérations actuelles de Kinross (CHRIS, 2012)</i>	28
<i>Figure28: West Branch Pushbacks Below End of December 2018 Topography Source: Mining department, TMLSA</i>	29
<i>Figure29: Flowsheet des opérations d'exploitation de la mine de Tasiast (Source: Mémoire de Mamadou Aliou Dia, 2014)</i>	30
<i>Figure30: flowsheet des différentes étapes de traitement de la mine de Tasiast (Source: processing department, TMLSA)</i>	31
<i>Figure31 : Concasseur première</i>	32
<i>Figure32: Roche au moment du concassage (Source: processing department, TMLSA)</i>	32
<i>Figure33: SAG MILL (Source: processing department, TMLSA)</i>	33
<i>Figure34: circuit de lixivition (Source: processing department, TMLSA)</i>	33
<i>Figure35: Epaisseur ou thickener (Source: processing department, TMLSA)</i>	33
<i>Figure36: circuit d'éluion (Source : processing department, TMLSA)</i>	34
<i>Figure37: circuit d'électrolyse (Source: processing department, TMLSA)</i>	34
<i>Figure38: flowsheet de la lixiviation en tas (Source: processing department, TMLSA)</i>	35
<i>Figure39 : Système DFMS</i>	42
<i>Figure40 : Dimensionnements des camions 793D</i>	44
<i>Figure41 : Camion de capacité 235T</i>	44
<i>Figure42 : Camion de capacité 220T</i>	44
<i>Figure:43 Variation de l'utilisation réalisé par rapport à l'utilisation à celle planifié</i>	46
<i>Figure:44Pareto Operating Standby</i>	47
<i>Figure45 : Pareto Operating Delay</i>	51

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1Caractéristiques des camions 793D</i>	44
<i>Tableau 2variation de l'utilisation réalisé par rapport à l'utilisation à celle planifié</i>	45
<i>Tableau 3Variation de Operating standby</i>	46
<i>Tableau 4variation de no loading units</i>	47
<i>Tableau 5variation de friday pray</i>	48
<i>Tableau 6Variation de weather</i>	49
<i>Tableau 7variation de return from maintenance</i>	50
<i>Tableau 8Variation de shiftchange</i>	50
<i>Tableau 9Variation effectuée pour les operating delay</i>	51
<i>Tableau 10Variation de prayer</i>	52
<i>Tableau 11Variation de blasting</i>	53
<i>Tableau 12Variation de meal</i>	53
<i>Tableau 13Variation de fueling</i>	54
<i>Tableau 14Variation de wait crusher</i>	55

Sommaire

Dédicace	I
Remerciements	II
Introduction	1
CHAPITRE 1	2
LE SOCLE PRECAMBRIEN DE L'AFRIQUE DE L'OUEST	2
1 Le Précambrien africain et son importance économique.....	3
2 Le craton ouest africain (WAC)	5
3 Cadre géographique et géologique de la Mauritanie	7
3.1 Cadre géographique.....	7
3.2 Géologie de la Mauritanie	7
3.2.1 Ensembles géologiques de la Mauritanie	8
3.2.2 Aperçu sur la géologie de la dorsale Réguibat	12
3.2.3 l'Archéen de la dorsale Réguibat.....	12
3.2.4 Tectonique.....	15
CHAPITRE 2	17
L'UNITE DE TASIAST ET LA CEINTURE D'AOUEOUAT	17
4 L'unité de Tasiast	18
4.1 Les grands ensembles lithologiques	18
4.2 Le métamorphisme	19
4.3 Tectonique	19
5 Étude géologique	21
5.1 Les minéralisations à tasiast	21
5.1.1 la minéralisation ferrifère	21
5.1.2 La minéralisation sulfurée	22
5.2 L'encaissant de la minéralisation	24
5.3 Conclusion à l'étude géologique.....	24
5.4 LA CEINTURE DE L'AOUEOUAT	25
5.4.1 Cadre géologique.....	25
5.4.2 La paragenèse de la ceinture d'Aouéouat.....	26
CHAPITRE 3	27
LES OPÉRATIONS MINIÈRES A TASIAST	27
6 Historique de la mine de Kinross Tasiast	28

7	Régime d'exploitation	28
8	Usine de traitement CIL (Carbon in Leach)	31
8.1	Le concassage.....	31
8.2	Le broyage.....	32
8.3	Epaissement et Lixiviation	33
8.4	Charbon en lixiviation (C.E.L).....	34
8.5	Elution du charbon	34
8.6	Electrolyse et raffinage.....	34
9	L'usine de traitement ADR (Adsorption, Désorption, Raffinage)	35
	CHAPITRE 4	36
10	Présentation et contexte de sujet.....	37
10.1	Problématique.....	37
10.2	Importance et criticité.....	39
10.3	Données de dispatch.....	42
10.4	Engins de transport.....	43
10.5	Caractéristiques et dimensionnements des camions 793D	44
10.6	Analyses, Interprétations et Recommandations.....	45
10.6.1	Utilisation	45
	CHAPITRE 5 : Recommandations.....	56
11	Recommandations	57
11.1	Maximisation de la charge utile :	57
11.2	Réduction du temps de positionnement.....	57
11.3	Réduction du temps de chargement :.....	58
11.4	Réduction du temps d'attente à la pelle :.....	58
11.5	Reduction du temps de déplacement :	58
11.6	Maximisation de l'utilisation :.....	59
11.7	Recommandation générale sur la disponibilité.....	59
12	Conclusion.....	60
13	Bibliographie	61

Introduction

Les mines à ciel ouvert représentent environ 60 % des exploitations minières dans le monde (Ercelebi et Basscetin, 2009), dont la plupart sont exploitées par fosse, vu le nombre important des gisements hydrothermaux sous forme d'amas. Cette méthode consiste à exploiter le corps minéralisé du haut vers le bas par des couches horizontales appelées gradins (Benches).

Pour extraire les minerais, il est primordial d'abattre et de transporter des grandes masses des stériles hors de la fosse. Cette dernière évolue de manière proportionnelle avec le ratio de stérile/minerais, qui est conséquent pour les mines d'Or, telles que la mine de Tasiast (Kinross Gold Corporation).

Les opérations relatives à l'exploitation d'une fosse requièrent l'étude de plusieurs paramètres, dont le chargement et le transport du minerai. Ces dernières nécessitent un choix et une utilisation d'engins spécialisés. Le transport du minerai au sein de la mine de Tasiast connaît plusieurs anomalies dues à la performance des camions (modèle 793D) utilisés par la compagnie.

Une étude s'avère cruciale afin d'accroître l'efficacité opérationnelle de ces engins et donc d'augmenter la productivité de la mine. En effet, l'entreprise a constaté des anomalies au niveau du cycle de l'exploitation qui se répercutent sur le plan financier. C'est dans cette perspective que j'ai réalisé ce travail afin de proposer une optimisation des performances des camions de type 793D au sein de la société.

Le mémoire est divisé en cinq chapitres : La première partie est consacrée à la géologie du socle précambrien de l'Afrique de l'ouest, la deuxième partie met en évidence les aspects géologiques de l'unité de Tasiast et la ceinture d'Aoueuat, la troisième partie est consacrée aux opérations minières à Tasiast, dans la quatrième partie une analyse est effectuée sur des différents paramètres la performance des camions de type 793D.

Enfin, des conclusions et des recommandations seront présentées pour synthétiser et interpréter les principaux résultats

CHAPITRE 1
LE SOCLE PRECAMBRIEN DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

1 Le Précambrien africain et son importance économique

Les terrains archéens et plus largement précambriens sont d'une grande importance économique à l'échelle du globe car ils englobent l'essentiel de gisements d'or dit orogénique, de l'or des paléoplacers, des VHMS (Volcanic-Hosted Massive Sulfide), le Ni et Cu associés aux Komatites et les formations ferrifères litées (BIF ou Banded Iron Formations). Ils englobent aussi les intrusions post-archéennes riches en PGE (Platinum Group Elements), en Cr et Ni ainsi que les formations diamantifères, les latérites nickélifères et les bauxites. D'autres provinces géologiques riches en ressources minérales sont aussi décrites comme étant développées sur les marges des noyaux archéens (protérozoïques). Les terrains archéens sont aussi des laboratoires naturels apportant les réponses aux questions fondamentales liées au début de l'évolution de notre planète quand les premières croûtes continentales sont extraites à partir de la Terre primitive. Toutes ces questions sont liées aux processus s'opérant dans le manteau terrestre, à la nature de la lithosphère formée aux temps archéens et aux processus de formation, de stabilisation et de préservation des continents par les processus géodynamiques. Ces derniers ne peuvent être directement liés aux processus actuels s'opérant dans ou aux frontières des plaques lithosphériques sur la base du principe de l'actualisme. Les processus s'opérant à l'archéen devaient donc être différents impliquant ainsi des approches différentes. L'Afrique précambrienne présente 57% de la superficie du continent noir. Elle est composée de quatre cratons (Figure 1) qui correspondent chacun à des croûtes continentales stabilisées vers 1,6 Ga et séparées par des zones plus ou moins larges appelées ceintures orogéniques ou zones polycycliques. L'importance géologique et géographique du précambrien africain est accentuée par son importance économique, puisque le précambrien recèle d'importants gisements d'or, de chrome, de cuivre, de diamant, de fer, de nickel, des platinoïdes, d'uranium, d'étain, de manganèse, etc. Quelques données de BRGM montrent l'importance économique de l'Afrique précambrienne (in Marot et al., 2003), par exemple :

- 98 % de l'or et 75% du fer d'Afrique (production passée et ressources) proviennent des cratons anté 1.6 Ga,
- 60% en valeur de la production mondiale de diamant gemme provient d'Afrique dont la moitié est portée par les cratons précambriens,
- 92% du nickel d'Afrique (production passée et ressources) proviennent aussi des cratons anté 1.6 Ga,

- 52% de la production mondiale de chrome (1998) et 90% du chrome d'Afrique (production passée et ressources) proviennent respectivement du craton du Kalahari et des autres cratons anté 1.6 Ga
- 99% des platinoïdes d'Afrique (production passée et ressources), soit 85% des réserves mondiales proviennent également des cratons anté 1.6 Ga dont 93% pour la seule période du paléoprotérozoïque.



Figure 1 :Représentation simplifiée de l'Afrique et de ses quatre cratons précambriens

2 Le craton ouest africain (WAC)

L'Afrique de l'ouest est caractérisée du point de vue géologique par le craton ouest-africain qui en occupe la partie majeure. C'est un immense craton d'environ 4.500.000 km² de surface formé d'un ensemble de chaînes pénéplanées largement granitisées appartenant au précambrien ancien. Deux épisodes orogéniques majeurs marquent l'histoire ancienne du WAC (Bessoles, 1771 in Boher, 1992) : le Libérien (entre 3.0 Ga et 2.5 Ga) et l'Eburnéen (entre 2.5 et 1.8 Ga) au terme duquel le WAC s'est définitivement stabilisé vers 1.9 Ga (Liégeois et al., 1991). Il est recouvert, dans une large part, par les formations du bassin de Taoudéni. Les principaux affleurements du WAC apparaissent tout autour de ce bassin (figures 2):

- Au Nord dans la dorsale Réguibat formée dans sa partie ouest par des gneiss, orthogneiss et chornockites archéens d'environ 2.7 Ga et dans sa partie est par des granites et autres formations volcaniques et volcanosédimentaires du protérozoïque inférieur (Birimien). Ces deux domaines sont séparés par des zones de cisaillement correspondant à la faille de Zednès;
- A l'Ouest dans les fenêtres de Kédougou-Kéniéba de Kayes à la frontière sénégalomaliennne. Elles sont formées exclusivement de formations birrimiennes du protérozoïque consistant en d'étroites ceintures volcaniques et en de larges bassins sédimentaires structurés et intrudés par des granitoïdes à l'éburnéen (Liégeois et al., 1991). L'archéen n'ayant jamais été daté dans ces fenêtres.
- Au sud par la dorsale de Léo qui couvre une large région qui va du Liberia au Ghana en passant par la Guinée, le Mali et la Côte d'Ivoire et le Burkina-Faso. Elle est divisée aussi en deux parties : à l'ouest, le domaine archéen de Man et à l'est, le domaine Birrimien du Baoulé-Mossi qui serait le prolongement des formations birrimiennes de Kédougou-Kéniéba sous les formations paléozoïques du SW du bassin de Taoudéni (Bassot et Caen-Vachette, 1984). Les deux domaines sont séparés par l'accident de Sassandra. L'archéen du Man, daté de 2.7 Ga, est formé de gneiss métamorphisés dans le faciès granulite durant les cycles orogéniques du Léonien (3.0 à 2.7Ga) et du Libérien (2.7 à 2.6 Ga), (Bakinsale et al., 1980 ; Camil et al., 1983, in Feybesse et Milesi , 1994). Ces gneiss sont surmontés de roches vertes associant des métasédiments, des métavolcanites et des formations ferrifères litées (BIF). Le Birrimien du Baoulé Moussi est composé de métasédiments paléoprotérozoïques, de métavolcanites et de granites mis en place autour de 2.2 - 2.1 Ga (Abouchami et al., 1990). Les structures de ce domaine sont le résultat de deux déformations paléoprotérozoïques majeures : la première résulte d'une tectonique

tangentielle (Liégeois et al., 1991 ; Feybesse et al., 1990) à l'origine de structures orientées N-S à NNE-SSW. La seconde correspond à une déformation transcurrente (Lémoine, 1988 ; Ledru, 1991 ; in Feybesse et Milesi, 1994).

- Elle est soulignée par la mise en place, autour de 2.1 Ga, de grands ensembles de granitoïdes. Le WAC est limité à l'Est et au SE par des tronçons de la chaîne panafricaine érigée au méso et néoprotérozoïque entre 1.8 et 0.6 Ga : Ahaggar et Adrar des Iforas à l'Est et les boucliers du Bénin et du Ghana au SE. A l'Ouest des fenêtres de Kayes et de Kédougou Kéniéba, le WAC est limité par la chaîne calédono-hercynienne des Mauritanides structurée depuis la fin du Précambrien jusqu'à le Dévonien.

Enfin l'immense bassin de Taoudeni, d'une superficie de 1.5 millions de km², recouvre en discordance majeure le coeur du WAC. Il s'agit là du plus vaste dépocentre néoprotérozoïque du monde. Il est formé de plateaux calcaires et de grès dont la majeure partie est sous l'emprise de dunes mobiles ou statiques. Il compte une large part des gisements ou indices pétroliers entre le Mali, l'Algérie, la Mauritanie et le Niger.

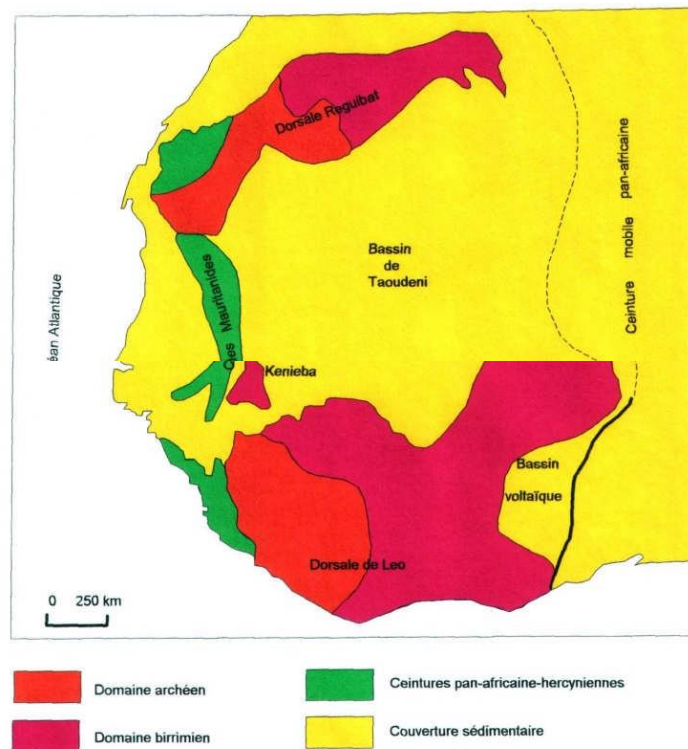


Figure: 2 Schématisation montrant les grands ensembles géologiques de l'Afrique de l'ouest (Lémoine, 1988 ; Ledru, 1991 ; in Feybesse et Milesi, 1994).

3 Cadre géographique et géologique de la Mauritanie

3.1 Cadre géographique

La Mauritanie (ou République Islamique de Mauritanie) est un pays de l’Afrique de l’Ouest bordé par l’Océan atlantique à l’ouest et est limitrophe au pays du RASD au Nord, à l’Algérie au nord-est, au Mali à l’est et enfin au Sénégal au sud (Figure 3). Classée 29ème pays ayant la plus grande superficie au monde avec 1.030.700 km², elle constitue un des pays le plus vaste de l’Afrique. Le climat qui y règne est exclusivement aride, chaud et sec, avec des températures annuelles maximales de plus de 44°C entre mai et août. Les précipitations sont rares, la pluviométrie (40 -50mm/an). Mis à part le plateau de l’Adrar situé au centre ouest du pays qui culmine à 915 mètres d’altitude, l’altitude moyenne reste très faible, autour de 150 mètres, et les dénivelés relativement lissés.

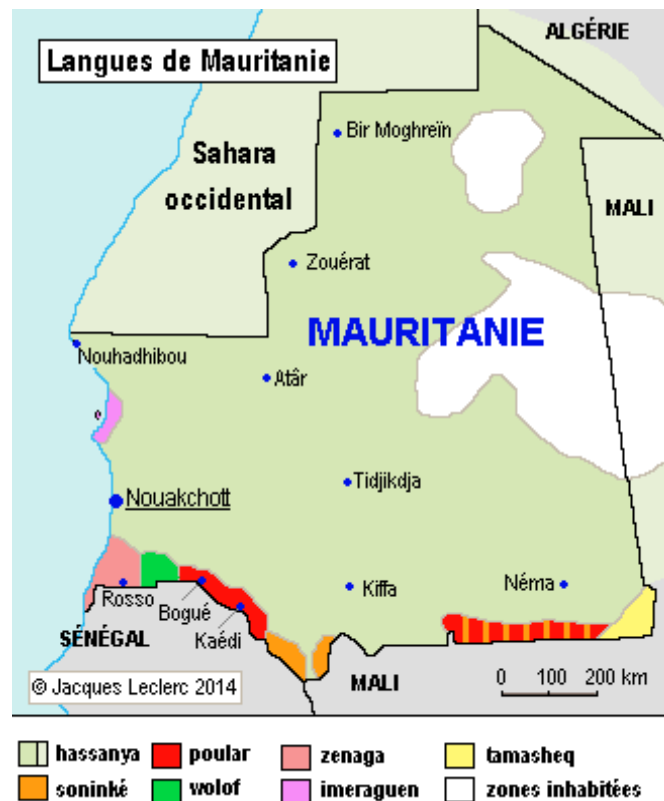
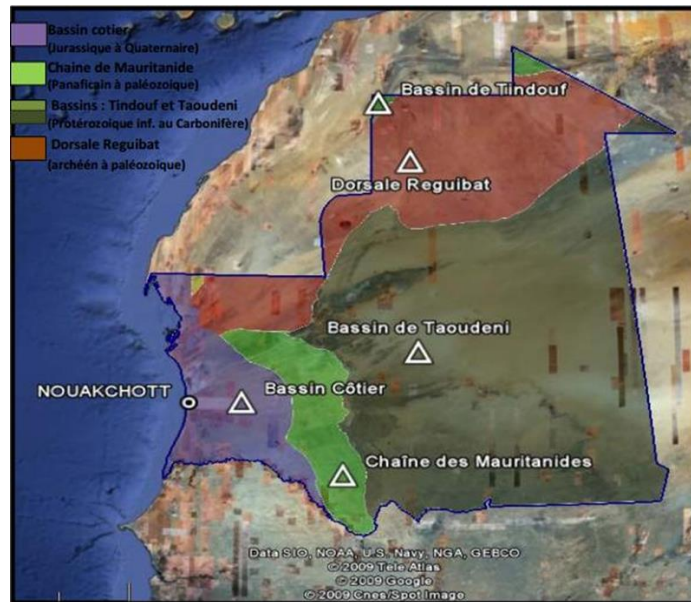


Figure 3: Carte géographique de la Mauritanie. Source: Perry-Castaneda Library Map Collection,

3.2 Géologie de la Mauritanie

La Mauritanie comprend cinq provinces géologiques (Figure 4) : La Dorsale de Réguibat, le Bassin de Taoudéni, le Bassin de Tindouf, la chaîne des Mauritanides et le Bassin sédimentaire côtier. La Dorsale de Réguibat est composée de groupes archéens et paléoprotozoïques et de granites. Le Bassin de Taoudéni et le Bassin de Tindouf sont

constituées de roches sédimentaires néoprotérozoïques et paléozoïques. La Chaîne des Mauritanides s'est formée à la suite d'événements orogéniques survenus pendant la fin du Protérozoïque et du Paléozoïque. Le Bassin sédimentaire côtier Atlantique est composé de roches sédimentaires cénozoïques.



FigureError! Use the Home tab to apply 0 to the text that you want to appear here. 4: Carte des grands ensembles Géologiques en Mauritanie Bronner et al., 1992

3.2.1 Ensembles géologiques de la Mauritanie

3.2.1.1 La Dorsale de Réguibat

La Dorsale Réguibat couvre le nord de la Mauritanie. Elle est composée de roches métamorphiques et de granites archéens et paléoprotérozoïques qui forment la bordure nord-ouest du craton Ouest-Africain. L'Archéen est constitué de roches métamorphiques et granitiques. Les roches métamorphiques sont constituées de quartzites ferrugineux, des micaschistes, des gneiss (incluant les leptynites) et des amphibolites. Le Protérozoïque inférieur consiste en roches volcano-sédimentaires et en granites, et est posé en couches discordantes. L'Archéen dans le sud-ouest de la Dorsale Réguibat est appelé socle d'Amsaga qui est divisé en complexe du Rag el Abiod et en série de la Saouda (Basé sur des données **de BRGM, 1975**).

3.2.1.2 Le Bassin de Taoudéni

Le Bassin de Taoudéni est un bassin de grande échelle qui occupe les deux tiers du craton Ouest-Africain. Il est localisé au sud-est de la Dorsale Réguibat. Sa partie occidentale constitue plus de la moitié du territoire Mauritanien. Le bassin est composé de formations protérozoïques supérieure, de formations cambro-ordoviciennes, et de roches sédimentaires

d'âge allant du Silurien au Carbonifère. Sa partie orientale est couverte de sédiments mésozoïques à cénozoïques. La succession paléozoïque est due à des mouvements tectoniques faibles, et présente une structure plate avec quelques failles, révélant une structure simple.

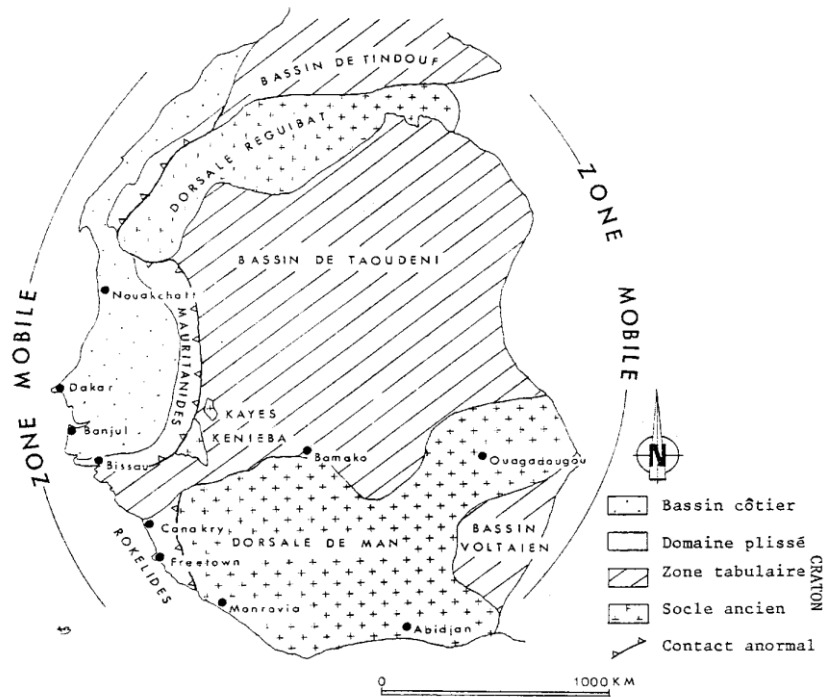


Figure 5: Bassin de Taoudeni (Source: MPEMI)

3.2.1.3 Bassin de Tindouf

Quelques parties du Bassin de Tindouf interceptent de petits secteurs près des frontières du RASD ou de l'Algérie. Le bassin recouvre la Dorsale Réguiabat, et se compose de dolomies du Protérozoïque supérieur et de grès, de schistes et de calcaires de l'Ordovicien-Dévonien (BRGM, 1975).

3.2.1.4 La chaîne des Mauritanides

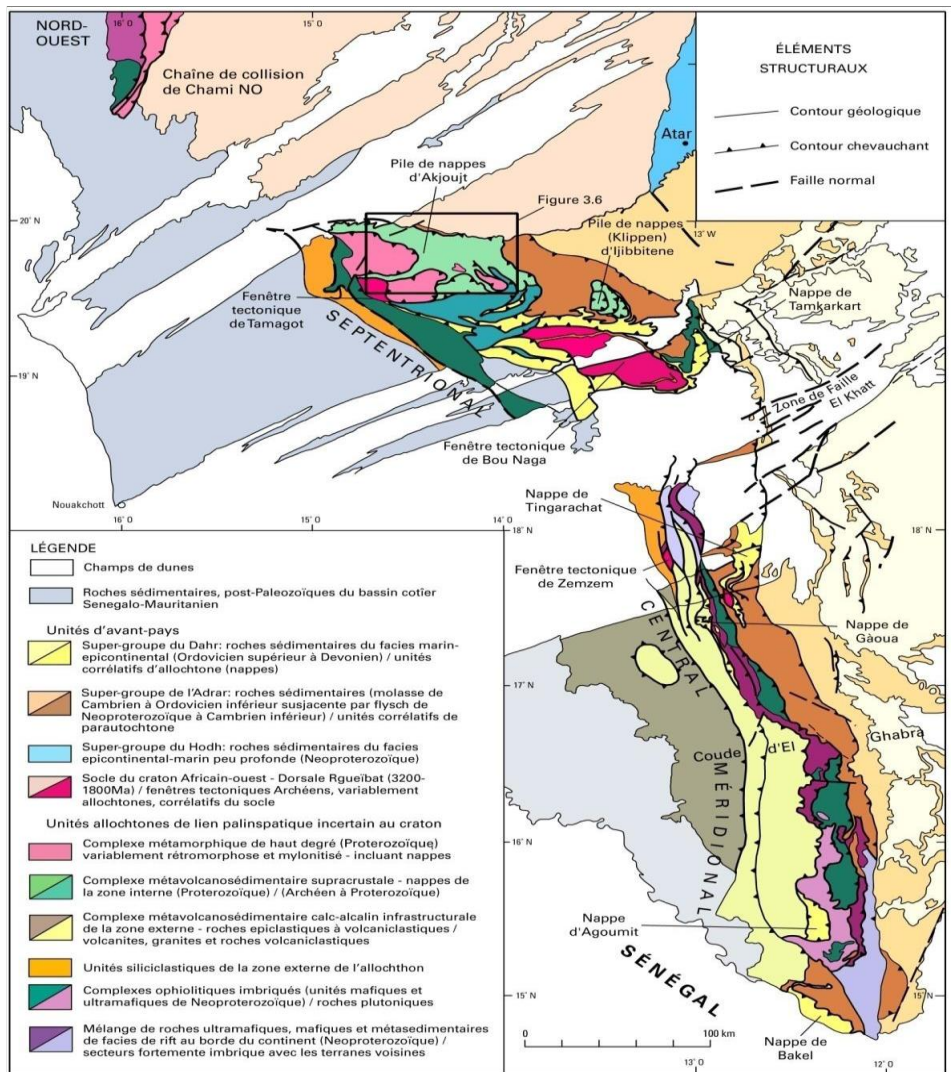


Figure 6: Chaîne des Mauritanides (Source: MPEMI)

La chaîne des Mauritanides, est caractérisée par des plis et des chevauchements formés par l'orogénèse hercynienne au Paléozoïque, et se situe à la marge occidentale du Craton Ouest-Africain. Elle s'étire sur plus que 2.500km, du Sénégal au RASD en passant par la Mauritanie. Elle montre une direction NNW - SSE en Mauritanie et en atteint une largeur de 150km. Elle est constituée par les roches sédimentaires, des roches magmatiques et métamorphiques d'âge allant du Précambrien au Paléozoïque.

3.2.1.5 Le Bassin Sédimentaire Côtier Atlantique

Le Bassin Sédimentaire Côtier Atlantique est situé à l'ouest des Mauritanides. Il est constitué par des sédiments et des roches sédimentaires dont l'âge s'étale du Crétacé inférieur au Quaternaire.

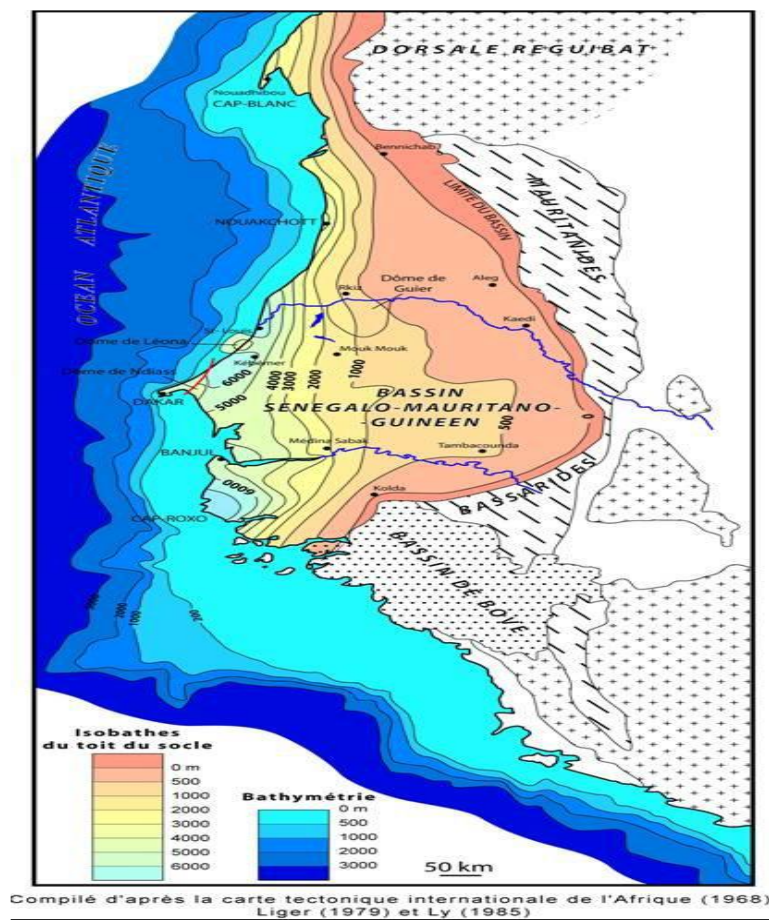


Figure 7: Bassin cotier (Source: MPEMI)

3.2.2 Aperçu sur la géologie de la dorsale Réguibat

La Dorsale Réguibat, partie septentrionale du Craton Ouest-africain, est une vaste boutonnière allongée SW-NE qui affleure pour l'essentiel en Mauritanie, au RASD et en Algérie. Elle se situe entre les méridiens 3° et 16° Ouest d'une part et les parallèles 20° et 27° Nord d'autre part et couvre une zone de 1500 km de long sur 250 à 400 km de large. Elle est limitée, à l'Est par la chaîne mobile de l'Afrique centrale, à l'Ouest elle est limitée par la chaîne des Mauritanides et par le bassin côtier sénégal-mauritanien. Au sud et au nord, elle s'enneige sous la couverture sédimentaire des bassins de Taoudeni et de Tindouf respectivement. Comme son équivalent méridional (dorsale de Léo), la dorsale Réguibat est formée en grande partie de terrains catazonaux plissés et de granites anté 1600 Ma. Elle se divise en deux grands domaines, où les âges varient entre 3,5 Ga et 1,6 Ga :

- un domaine Archéen à l'ouest et sud-ouest, qui regroupe les formations de Tasiast-Oumabanna, Amsaga-Tiris et Ghalaman, formé par un socle granito-gneissique affecté par un métamorphisme catazonal ainsi que des ceintures de roches vertes et des quartzites ferrugineux (figure 8);
- un domaine Birimien (protérozoïque inférieur) relativement peu métamorphique, qui regroupe les régions de Karet, Yetti et Eglab., composé de ceintures volcanosédimentaires à formations ferrifères et de granitoïdes extrêmement variés, séparées par deux cortèges d'intrusions de granitoïdes recoupés par un épisode plutonique alcalin (figure 8).

3.2.3 l'Archéen de la dorsale Reguibat

L'Archéen est la période de temps âgée de 2,5 à 4 Ga, il s'agit d'un épisode d'intense activité magmatique pendant lequel presque 3/4 du volume de la croûte continentale a été extrait à partir du manteau. Les TTG (Tonalites-Trondhjemitites-Granites), les ceintures des roches vertes et la tectonique verticale (sagduction) sont les caractéristiques majeures de l'Archéen. Actuellement les gneiss du Canada datés à 4,0 Ga sont les roches terrestres les plus anciennes, Parallèlement en Mauritanie, les formations archéennes, où les âges peuvent atteindre 3,6 Ga (Chardon, 1996), sont les roches les plus anciennes dans le pays.

A l'exception des formations dunaires (d'Akchar et d'Azefal) au sud, des formations de la Kédia d'Idjil (d'âge protérozoïque inférieur) au nord et des terrains allochtones de la chaîne des Mauritanides à l'ouest, le domaine occidental de la dorsale Réguibat est quasiment constitué par les formations archéennes (Figure 8).

L'Archéen de la dorsale Réguibat, correspond à un socle formé essentiellement de granites, de gneiss et de ceintures de roches vertes. Il est affecté par un métamorphisme catazonal et une tectonique à dominante diapirique. L'ensemble est recoupé par des granites tardifs (2.6 Ga).

3.2.3.1 Lithostratigraphie

L'Archéen de la dorsale Réguibat peut être regroupé en trois grands domaines (Rocci et al., 1991) :

- Le domaine Tasiast-Lebzenia-Oumabana caractérisé par les ceintures de roches vertes et une structure en “mantled gneiss domes“, cette structure est bien visible dans la région de Tasiast. Il s'agit d'un socle granito-gneissique surmonté par un complexe volcanosédimentaire et par des quartzites ferrugineux. L'ensemble est souligné par des intrusions ultrabasiqes et recoupé par des pegmatites béryllifères, plus récentes, datées de 2.8-2.6 Ga.
- Le domaine Amsaga-Tiris-Ouassat caractérisé par l'abondance de gneiss très métamorphiques et par le développement des formations ferrifères (à magnétite) notamment au Tiris. Les formations d'Amsaga, ont été définies par Blanchot (1953). Elles sont limitées au Sud par les Mauritanides panafricaines (600 Ma) et surmontées à l'Est par la succession sédimentaire protérozoïques d'Atar non déformées. Elles regroupent trois unités lithologiques majeures :
 - ✓ des gneiss charnokitiques (Qtz+KF+Pl+Opx+Bt+-Cpx+-Amph) ;
 - ✓ des paragneiss qui correspondent à des leptynites et des métapélites (Qtz+KF+Pl+Crld+Grt+Sill=-Bt+-Graph) ;
 - ✓ des orthogneiss migmatitiques à composition de trondjhemite et de granodiorite (Qtz+KF+Pl+-Bt+-Opx+-Cpx) non plissés et associés aux ceintures volcanoclastiques (Pl+Qtz+Amph+-Opx+-Cpx+-Bt). Toutes ces formations ont été affectées par un métamorphisme granulitique. Les relations de phase dans les paragneiss et les calculs thermobarométriques indiquent un chemin PTt horaire avec des conditions paroxysmales correspondant à 800°C +-50°C et 5 +-1Kb. Les ages de 3 Ga obtenus sur les zircons sont interprétés comme correspondant aux âges des protolithes magmatiques des charnockites (Potrel, 1994). Des venues magmatiques tardives recoupent ces formations granulitiques. Elles correspondent aux granites de Touijenjert et aux gabbros de Iguilid d'age correspondant à 2.7 Ga (zircon et age modèle Sm-Nd) marquant la fin de l'épisode de métamorphisme de haut grade (Potrel, 1994 ; Potrel et al. 1996). Plus au nord, les formations du Tiris sont constituées par la succession, de plus de 8 km, des gneiss à hypersthène et des

leptynites à grenats avec des intercalations diverses de pyroxénoamphibolites, de cipolins et de gneiss à biotite. En position haute dans la succession, apparaît le faciès le plus caractéristique de la région : les quartzites à magnétite en bancs de 50 à 100 m d'épaisseur formant les gneiss ferrugineux qui apparaissent sur la figure 3. Plus au Nord, séparée de l'unité de Tiris par la faille d'El Mdena (figure 8) affleure l'unité de l'Ouassat. Les gneiss et les leptynites sont les faciès majeurs comparables à ceux de Tiris avec, cependant, un plus grand développement des cipolins. Au NE de l'Ouassat, la structure de l'unité de Sfariat (figure 8) est la plus remarquable. Contrairement à ce qu'on observe dans le Tiris, les quartzites à magnétite sont, dans cette unité, associées aux cipolins, aux leptynites et aux amphibolites. Elles dessinent des structures rectilignes d'orientation NW-SE. Ces formations allochtones (Bronner et al., 1992), sont jalonnées, au Nord, par des accidents qui ont joué en mouvements tangentiels et, au Sud, par des mylonites.

- **Le domaine Ghallaman** : Il s'agit d'un complexe de granitoïdes hétérogènes souvent décrits comme des panneaux de gneiss orientés NNW-SSE. Les faciès les plus fréquents sont de l'ouest vers l'est : les gneiss et les leptynites, les micaschistes, ainsi que les amphibolites et les pyroxénites. Les quartzites ferrugineux sont totalement absents dans ce secteur. Les gneiss sont fréquemment à hyperstène, grenat, amphibole ou pyroxène. Plus à l'est, ont été décrits des gneiss à biotite et à muscovite, des amphibolites, des gneiss alumineux et des cipolins. Des niveaux de quartzites non ferrugineux s'intercalent dans ces séries de lithologie variée.

3.2.3.2 Le métamorphisme

L'Archéen du craton ouest-Africain et en particulier celui de la Mauritanie est métamorphique. On note cependant que l'intensité du métamorphisme diminue de l'ouest (faciès granulite / amphibolite de haut degré) vers l'est (faciès amphibolite). Le principal épisode de métamorphisme est suivi par une rétro-morphose généralisée dans le faciès schiste vert. Le stade catazonal est généralement le mieux exprimé, suivi successivement par un stade amphibolitique, puis un stade "schistes verts", de façon plus ou moins continue. Les minéraux caractéristiques de ces trois stades sont les suivants (Bronner et al., 1992) :

- ✓ Stade granulitique : Opx, Cpx, Fo, Grt, Bt, Sil, Kfs, Spn
- ✓ Stade amphibolitique : Hbl, Pl, Ep, Grt
- ✓ Stade "schistes verts" : Ab, Chl, Tlc, Srp, Tr, Pmp

3.2.4 Tectonique

Les déformations archéennes sont très intenses et varient d'une région à l'autre de la dorsale. Elles peuvent être regroupées en deux familles : les déformations archéennes précoces essentiellement plicatives et les déformations gravitaires de type diapirique qui caractérisent les unités de Tiris, Tasiast et Oum Abana.

3.2.4.1 Tectonique précoce

Les principales phases tectoniques de cette déformation anté-gravitaire sont (Bronner et al., 1992)

Phase 1 : Phase plicative développant une foliation généralisée. Elle est synchrone du métamorphisme principal et généralement parallèle à la stratification avec des rares plis synschisteux de type semblable. Cette foliation est reprise par toutes les phases tectoniques ultérieures.

Phase 2 : phase plicative majeure de longueur d'onde centimétrique à kilométrique, caractérisée à l'affleurement par des plis à cannelures dans les quartzites ferrugineux, reprenant localement les plis isoclinaux post-schisteux dont les axes sont peu différents de ceux des plis de la phase 1.

Phase 3 : les plis associés à cette phase sont plus larges que ceux de phases 1 et 2, de longueur d'onde kilométrique à plurikilométrique, qui a pour effet de redresser les axes des plis de la phase 2.

Dans ces régions archéennes, la déformation est dominée par les plis kilométriques de la phase 2 qui représentent, à l'échelle de la carte, l'élément géométrique le plus constant.

3.2.4.2 Tectonique gravitaire de type diapirique

Il s'agit d'une tectonique verticale représenté par des dômes sphériques qui affectent les anticlinaux des phases précédentes. Cette phase de déformation, où le moteur principal est le gradient de densité, est caractérisée par des mouvements verticaux ascendants entraînant la montée des dômes granito-gneissiques et l'enfoncement de formations ultrabasiques entre ces dômes, entraînant aussi la distension des structures et l'effacement des structures précédentes (plicatives). Cette déformation diapirique semble être suivie par des phases de déformation cassante extensive à l'origine de l'injection d'une grande partie de roches basiques d'âge essentiellement Protérozoïque inférieur.

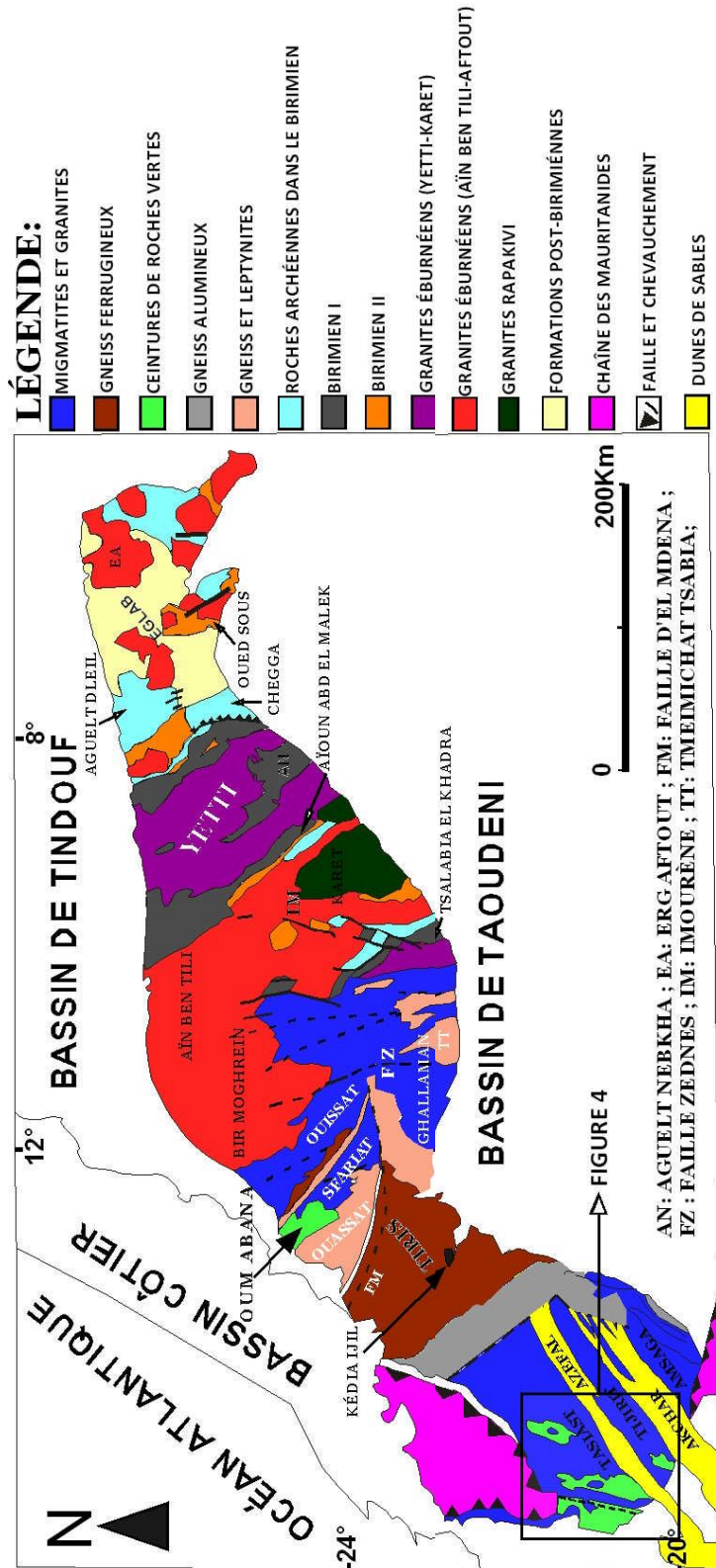


Figure 8: Unités lithostratigraphiques de la dorsale Réguibat (modifiée d'après Bronner et al,

CHAPITRE 2

L'UNITE DE TASTAST ET LA CEINTURE D'AOUEOUAT

4 L'unité de Tasiast

L'unité de Tasiast, appartient au domaine Tasiast-Lebzenia-Oumabana. Il se situe à l'extrémité sud-ouest de la partie archéenne de la dorsale Réguibat. Cette unité se prolonge vers le Nord au Sahara occidental (RASD) ; au Sud, elle est séparée de l'unité archéenne de Tijirit par le cordon dunaire de l'Azefal et à l'ouest la faille de Tiférchaï est la limite entre les formations de Tasiast et les formations allochtones de la chaîne des Mauritanides. L'étude géochronologique, effectuée sur une douzaine d'échantillons, donne des âges de l'ordre de 2600-3500 Ma (Chardon, 1996).

4.1 Les grands ensembles lithologiques

Le formations archéennes de Tasiast sont organisées, en un socle granito-gneissique et des formations supracrustales volcanosédimentaires correspondant à des ceintures de roches vertes (figure 9).

- ✓ Le socle granito-gneissique est formé essentiellement par des roches appartenant à la série des tonalites-trondhjémities-granodiorites (TTG). Les roches dominantes sont les orthogneiss migmatitiques et les granodiorites.
- ✓ Les ceintures de roches vertes correspondent au remplissage des bassins entre les dômes granito-gneissiques, elles sont constituées d'un complexe de roches volcano-sédimentaires. Au niveau de Tasiast, quatre ceintures de roches vertes ont été identifiées (figure 10), d'Ouest en Est, (Marot et al., 1997) :
 - La ceinture de Hadeïbt Agheyâne, à matériel basique, ultrabasique et volcanosédimentaire sans quartzites ni BIF.
 - La ceinture Khnéfissat, dépourvue de BIF aussi, séparée de la précédente par des para et orthogneiss injectés de pegmatites ;
 - La ceinture d'Aouéouat (ou de Chami) C'est la ceinture la plus complète du secteur. Elle est composée de métadacites, de metabasaltes, d'amphibolites à intercalations de gabbros, de quartzites micro-conglomératiques et de quartzites ferrugineux à magnétite (BIF).
 - La ceinture de N'daouas (ou ceinture d'Ahmeyim) où les formations mafiques prédominent (metabasalte, schiste ultrabasique), avec la présence de sherts, de sills felsiques et de nombreux filons de quartz.

On notera enfin que les terrains archéens de Tasiast sont recoupés par des intrusions granitiques tardives datées de 2,6 Ga et par des dykes de dolérite d'âge méso-cénozoïque (contemporaine avec l'ouverture de l'océan atlantique nord).

4.2 Le métamorphisme

Deux types de paragenèses ont été définis dans les assemblages minéralogiques du Tasiast (Chardon, 1997 in El Hadj, 2002) :

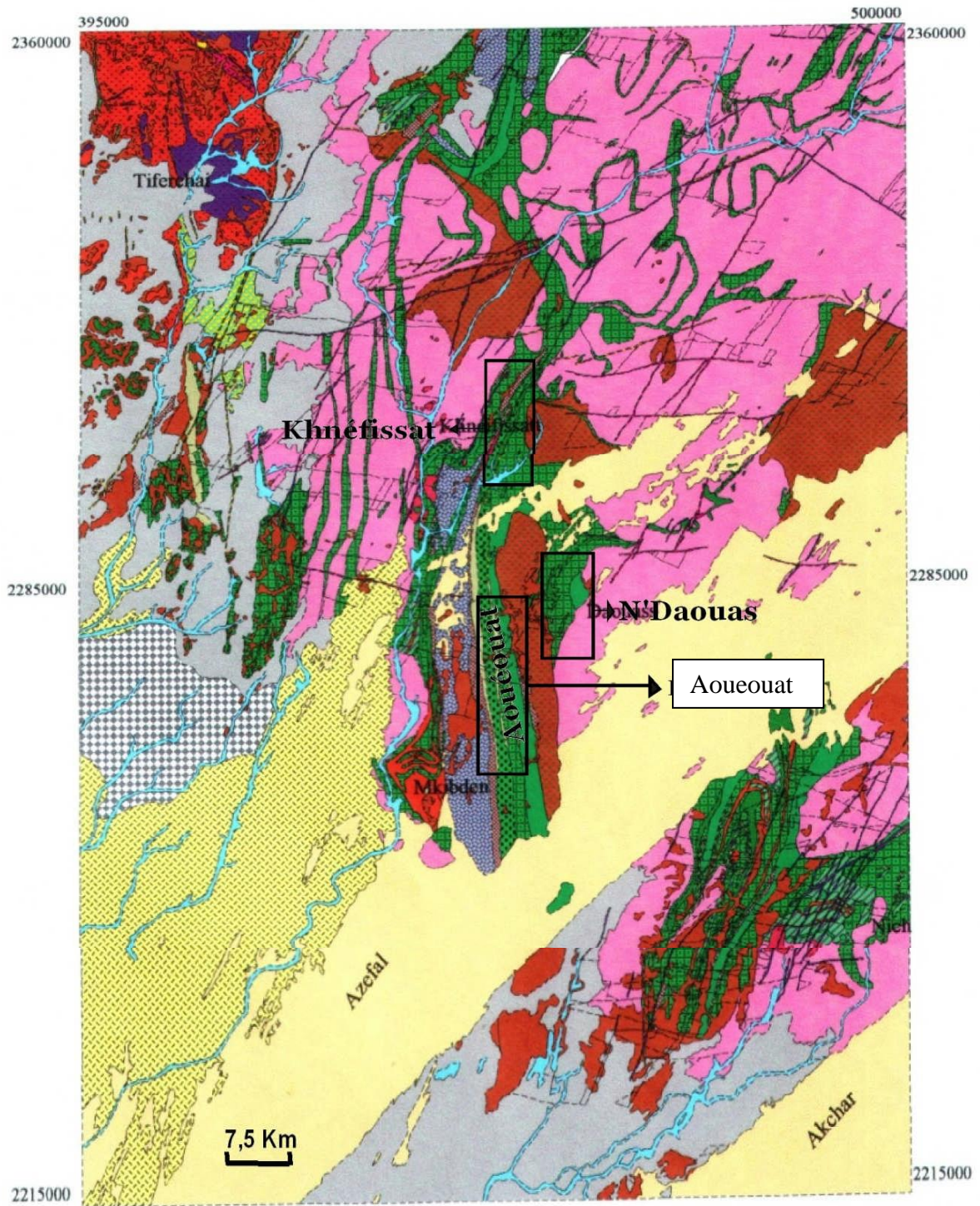
Une paragenèse du faciès amphibolite à $\text{Grt}+\text{Qtz}+\text{Chl}$ ou à $\text{Hbl}+\text{Pl}+\text{Qtz}$ et une paragenèse du faciès schiste vert à $\text{trémoliteactinote}+\text{épidote}+\text{zoïsite}+\text{calcite}+\text{prhénite}$. Cette dernière paragenèse se surimpose sur la première et correspond donc à une rétro-morphose généralisée. Elle s'accompagne aussi par une altération hydrothermale localement intense.

4.3 Tectonique

Les formations archéennes de Tasiast définissent des structures en dôme-et-bassin, où le socle granitogneissique forme les dômes et les ceintures des roches vertes occupent les bassins pincés entre ces dômes. Les trajectoires de la schistosité régionale S1 sont généralement parallèles au contact entre les roches supracrustales et les granitogneiss. Ces structures en dômes et bassins sont aplaties et orientées N-S à NNW-SSW. Une linéation L1 d'étirement est associée à S1 avec une orientation variable selon les secteurs.

Les structures ont été affectées par des cisaillements ductiles dextres orientés N-S à NNE-SSW Et généralement postérieurs à la formation des dômes. Ils se traduisent par la présence de zones de cisaillement et par la formation de zones mylonitiques. Ces déformations sont contemporaines de l'aplatissement général des structures.

Le moteur responsable de cette architecture est compatible avec le développement d'un fort gradient inverse de densité (des roches ultrabasiques très denses surplombent des TTG moins denses) interférant avec un champ de déformation régionale en raccourcissement et des zones de cisaillements transcurrents. Cette dynamique implique d'une part l'enfoncement des roches supracrustales dans le socle granitogneissiques et la remontée de ce dernier, moins dense, d'autre part.



- | | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------|
| Grès conglomératique à galets de quartz noirs | Schistes à amphiboles | Granodiorites | Gneiss mylonitiques |
| Quartzite | Métadiorites | Rhyolites | Gabbro-norites |
| Formations volcanosédimentaires (volcanites, tufs, brèches) | Métagabbro | Pegmatites | Filon de dolérite |
| Micaschistes | Ultrabasites (serpentinites, tremolites, carbonatites, birbirites) | Amphibolites à grenats | Filon de gabbro |
| Quartzite ferrugineux | Orthogneiss migmatitiques | Eclogites + ou - amphibolitisées | Filon de quartz |
| Métabasites en coussins (Amphibolites) | Granites | Granulites | Indéfini |

Figure9 : Carte géologique de la région de Tasiast-Tijrit (carte de Chami)

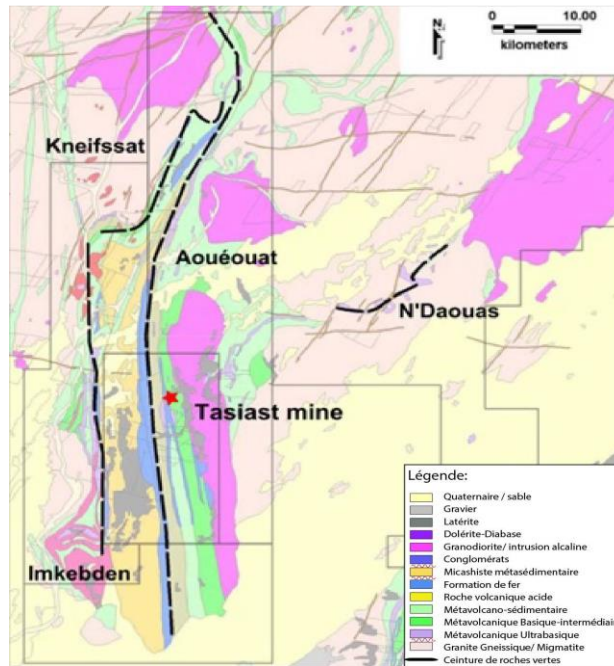


Figure 10 : Carte géologique de la région de Chami présentant les différentes ceintures de roches vertes au sein du district de Tasiast (BRGM 2007).

5 Étude gîtologique

5.1 Les minéralisations à tasiast

Les observations macroscopiques des échantillons étudiés ainsi que les observations microscopiques montrent qu'il existe deux types de minéralisation à Tasiast :

1. une minéralisation ferrifère à magnétite de type BIF
2. une minéralisation sulfurée à pyrrhotite dominante (Fig12).

5.1.1 la minéralisation ferrifère

Le gisement de Tasiast montre une minéralisation ferrifère, essentiellement à magnétite et hématite. Elle apparaît sous forme d'un rubanement très fin et constitue le type BIF, où elle est massive. *EL HADJ H. (2002)*

Cette magnétite peut être associée à quelques sulfures tels que la pyrite, la chalcopryrite, la pyrrhotite et l'or (Fig13).

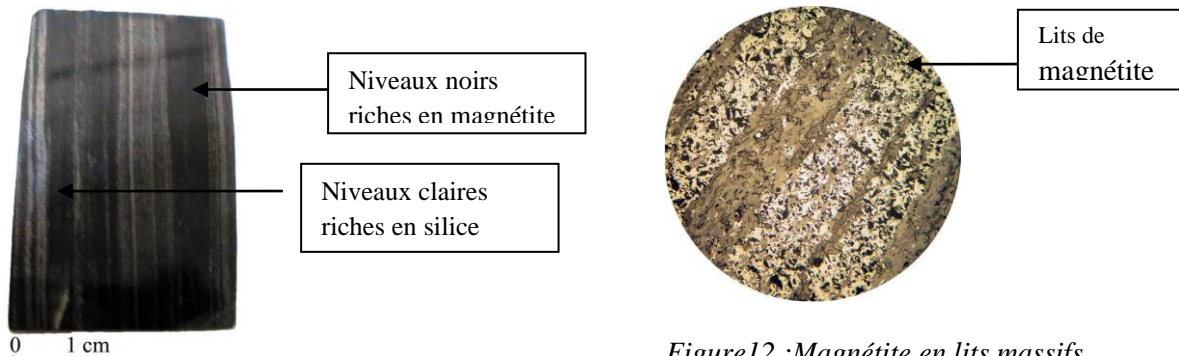


Figure 11: Section polie typique d'un échantillon des « BIM » (Banded Iron Magnetite) qui montre une alternance régulière entre les niveaux sombres et les niveaux clairs.

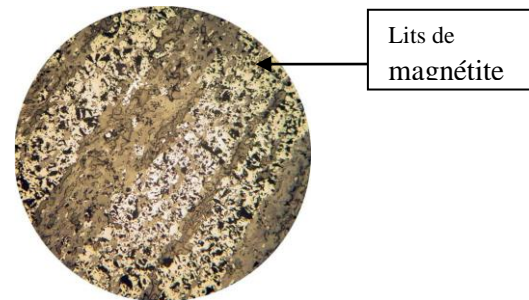


Figure 12 : Magnétite en lits massifs faisant $6\mu\text{m}$ à $12\mu\text{m}$ de large, observée en lumière réfléchie dans les formations de fer rubané. Section polie. Gx5.

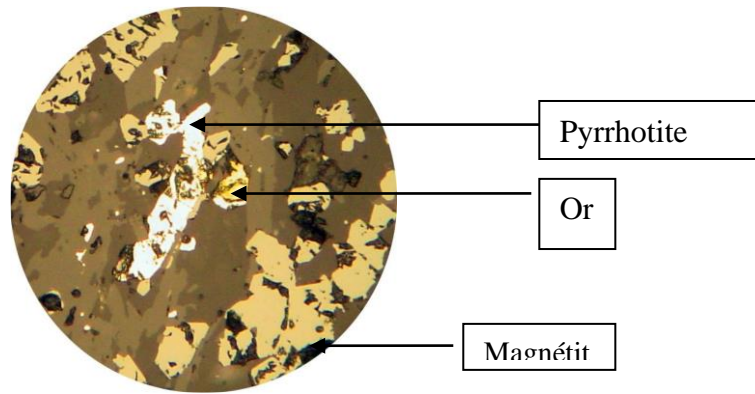


Figure13: La magnétite, pyrrhotite et d'or dans les formations de fer rubané Gx10.

5.1.2 La minéralisation sulfurée

La pyrrhotite est le minéral métallique le plus dominant, elle se présente en plages ou en veinules. Elle est dominante dans les schistes, les BIF riches en sulfures où elle est associée à la pyrite, la chalcopirite et l'or. *EL HADJ H. (2002)*

Rares cristallisations de chalcopirite dans la pyrrhotite en grande plages.

La chalcopirite est subordonnée, dispersée, se présente en plages, entoure la pyrite, elle est très rare, en cristaux automorphes et recoupe parfois la pyrrhotite.

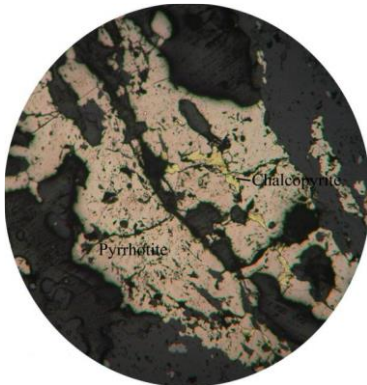


Figure15 : Association de chalcopirite et pyrrhotite Gx10.

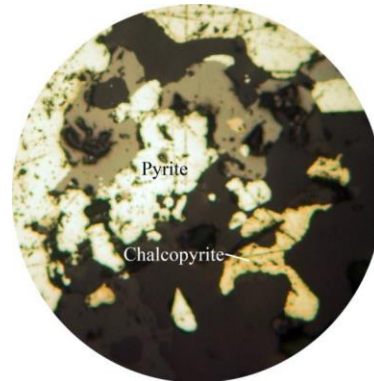


Figure14: Pyrite recoupe la magnétite et la chalcopirite qui semble être tardive Gx10

La pyrite est très fréquente, automorphe dans la majorité des cas, constitue des disséminations dans le quartz ou dans les différents faciès.

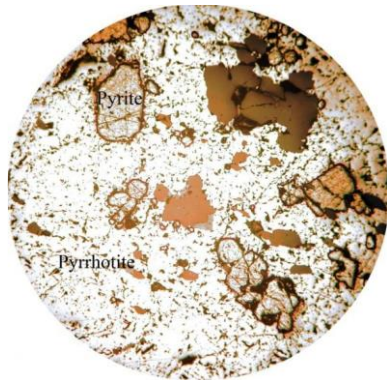


Figure17: Pyrite fracturée, disséminée dans la pyrrhotite dans un quartzite ferrugineux. Section polie.Gx10.

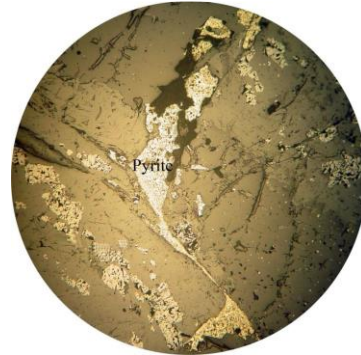


Figure16: Remplissage de fracture par la pyrite dans le faciès basique métamorphisé (amphibolite). Section polie.Gx10.

Deux générations de pyrite ont été observées sur une section polie :

Pyrite1 : Métamorphique, arsenicale à texture de recristallisation, en blastes est plus abondante.

Pyrite2 : Blanche qui semble se former la première après la magnétite.

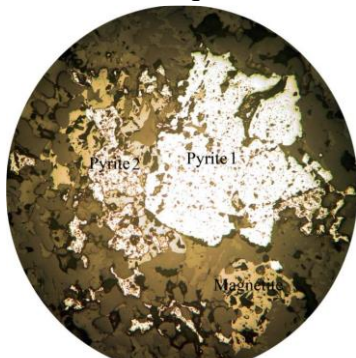


Figure19: Les deux générations de pyrite dans une metabasite. Section polie Gx10.

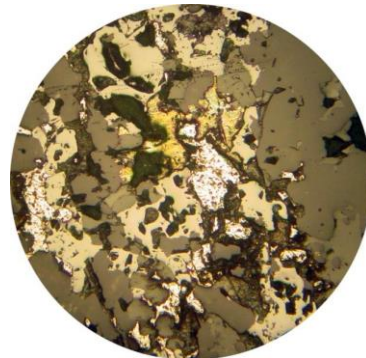


Figure 18: La chalcopyrite tardive entoure la pyrite de la deuxième génération. Section polie. Gx10

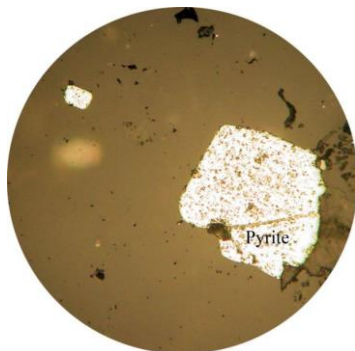


Figure21: Pyrite automorphe dans du quartz filonien Gx10.

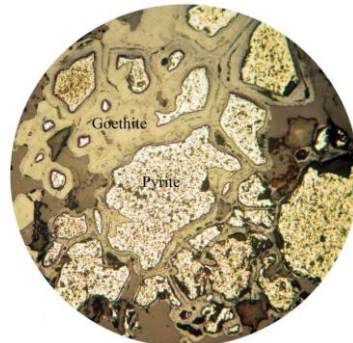


Figure20: Pyrite entourée de goethite après une oxydation tardive Gx10.

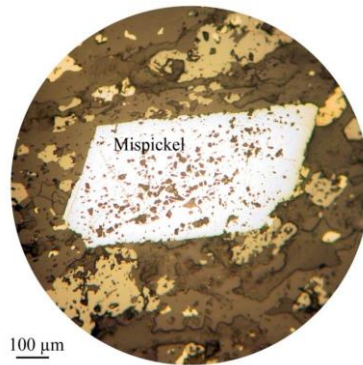


Figure 22: Mispickel ou arsenopyrite observé au microscope en lumière réfléchiée sur une section polie. Section polie. Gx10.

L'or a été reconnu dans les formations de fer rubané où il est associé à la pyrrhotite et la magnétite. C'est un or libre et il est très rare.

Dans les BIF riches en sulfures, dont la plus grande partie des minéraux métalliques est représentée par les grandes plages de pyrrhotite, l'or peut être associé à la pyrite en gros blastes. *EL HADJ H. (2002)*

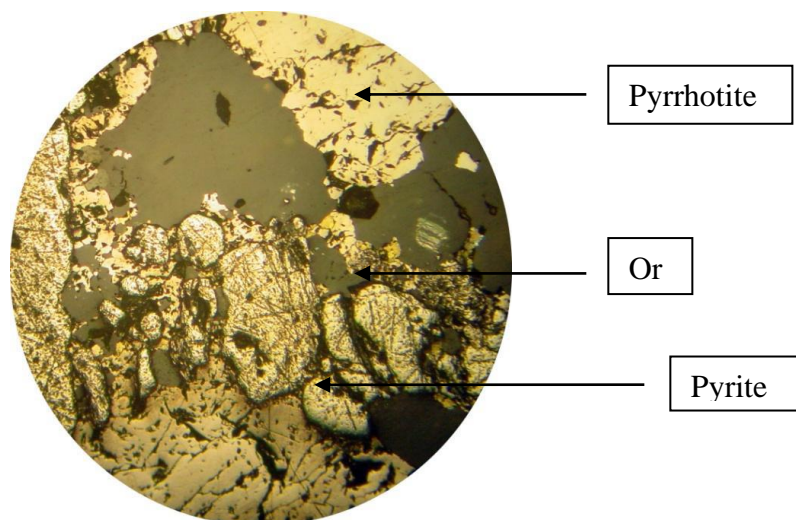


Figure 23: Association de pyrrhotite, pyrite et or dans un quartzite ferrugineux. Section polie. Gx10.

5.2 L'encaissant de la minéralisation

Les roches encaissantes de la minéralisation aurifère à Tasiast sont des ensembles volcano-sédimentaires archéens, métamorphisés dans les faciès schiste vert et amphibolite.

Les formations de fer rubané portent la minéralisation aurifère et peuvent être considérées comme un contrôle lithologique de cette minéralisation. *EL HADJ H. (2002)*

5.3 Conclusion à l'étude géologique

Le Tasiast est une unité archéenne composée de plusieurs types de roches représentées par les amphibolites issues des basaltes ou des gabbros, des schistes micacés, des quartzites

ferrugineux, des formations du fer rubané à magnétite, hématite, pyrrhotite, des métafelsites, des ensembles volcanosédimentaires, et des épicrostites.

Les roches observées présentent une schistosité marquée par les étirements de différents minéraux. La barytine a été rencontrée dans les schistes à biotite et chlorite, de façon ponctuelle. Les minéralisations rencontrées sont tardives, d'origine hydrothermale encaissées dans des roches métamorphiques. La première phase minéralisée est composée essentiellement de magnétite. *EL HADJ H. (2002)*

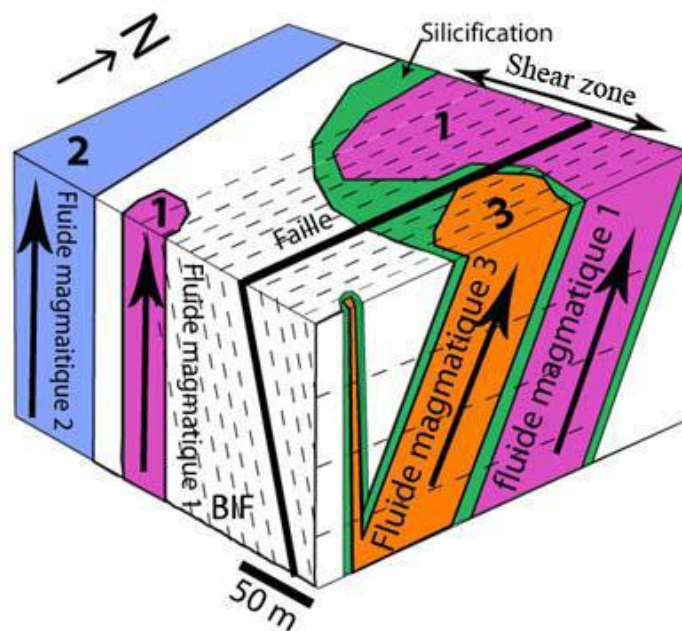


Figure 24 : Illustration des différents passages des fluides minéralisateurs à Tasiast. *EL HADJ H. (2002)*

5.4 LA CEINTURE DE L'AOUEOUAT

5.4.1 Cadre géologique

Le gisement est localisé dans une zone de cisaillement dextre qui s'est développée au contact entre le socle granito-gneissique et la ceinture de roches vertes d'Aouéouat d'âge Archéen, d'une longueur de 70 km sur 15 Km de largeur. La ceinture archéenne d'Aouéouat, déjà signalée comme étant la ceinture de roches vertes la plus complète de la région de Tasiast, correspond à l'association de roches mafiques et ultramafiques, de roches felsiques, de roches sédimentaires d'origine chimique (BIF) et de roches volcano-clastiques.

Elle est composée de trois unités lithologiques principales (*Marot et al. 1997*) :

- ✓ La partie inférieure du pile lithologique est composée d'une unité effusive basique constituée d'amphibolites à grains fins et de schiste à plagioclase et biotite, dans

laquelle ont été décrits des pillow-lavas et des schistes ultrabasiques à trémolite et chlorite associés aux metabasites ;

- ✓ La partie supérieure de la pile est composée d'une unité à dominante volcano-sédimentaire, constituée dans sa majeure partie, d'épiclastites quartzieuses à quartzofeldspathiques. Le reste est formé de quartzites rubanées à magnétite (100-200 m de puissance) et d'alternance de schistes verts et de quartzites à magnétite
- ✓ La partie médiane, située entre les deux unités précédentes, est constitué de métadacites en coulées bréchiques.

5.4.2 La paragenèse de la ceinture d'Aouéouat

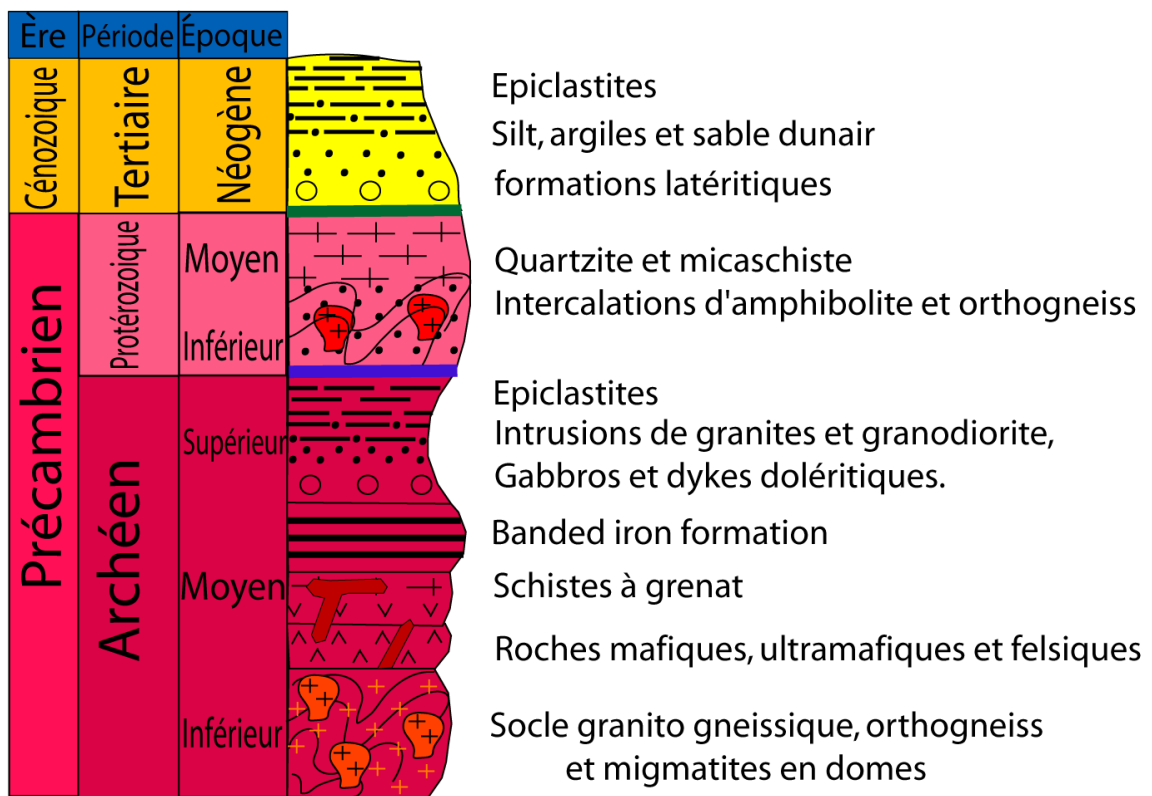


Figure 25: Coupe verticale synthétique des lithologies de la ceinture d'Aouéouat. (modifiée d'après Bronner et al, 1992).

CHAPITRE 3
LES OPÉRATIONS MINIÈRES A TASTAST

6 Historique de la mine de Kinross Tasiast

La mine de Tasiast est actuellement exploitée par la compagnie « Kinross Gold Corporation ». C'est une compagnie minière d'exploration et d'exploitation des gisements aurifères à l'échelle internationale. Son siège est basé au Canada à Toronto et elle possède dix mines en opération et six projets miniers en développement. Elle est largement présente en Amérique du Nord et en Amérique du Sud, mais aussi en Afrique de l'Ouest (Mauritanie et Ghana) et en Russie (Figure 26).

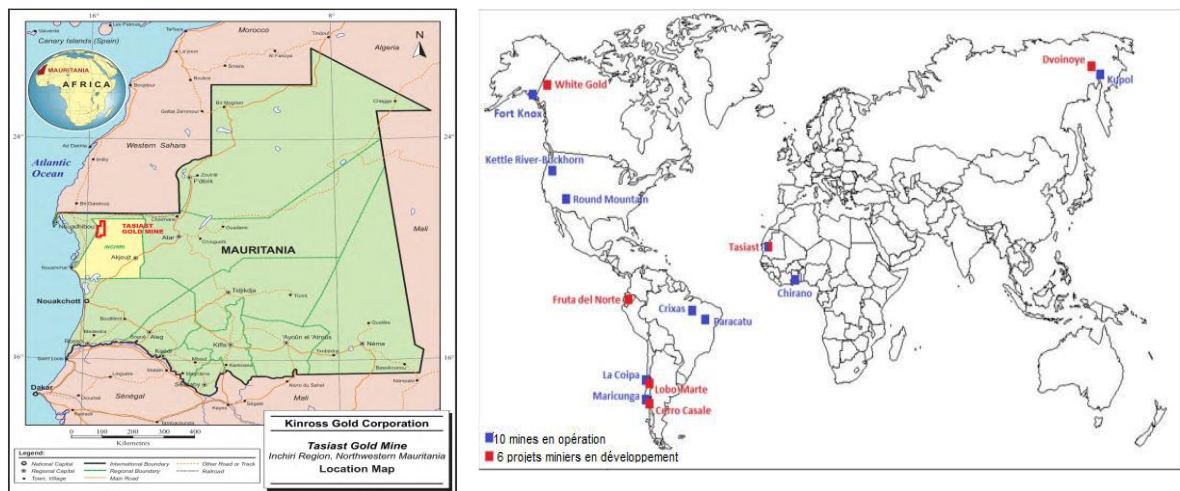


Figure 26 : Carte du monde localisant les opérations actuelles de Kinross (CHRIS, 2012).

La société Tasiast Mauritanie Limited S.A. (TMLSA), filiale de l'opérateur minier canadien Kinross Gold Corporation, est le plus grand producteur d'or en Mauritanie avec une production actuelle de 37 000 OZ par mois. Les opérations minières à TASIAST se caractérisent par une exploitation à ciel ouvert. La société dispose de quatre sites d'extraction à savoir : le piment sud, le piment central, le piment nord (qui sont tous inactifs) et le West Branch qui est en exploitation depuis 2013 (West Branch 1, West Branch 2, West Branch 3 et West Branch 4). Le minerai est extrait par des travaux de forage et de tiret transporté par des camions, vers les usines de traitement qui diffèrent en fonction de la teneur en or dans le minerai. Le minerai à forte teneur est transporté vers l'usine CIL (Carbon In Leach), alors que celui à faible teneur est envoyé à l'usine ADR (Adsorption, Désorption, Raffinage), passant par la lixiviation en tas.

7 Régime d'exploitation

L'exploitation minière ou l'extraction minière est l'activité qui consiste à extraire de la terre des matériaux géologiques utiles, des concentrations minérales présentes en quantité exploitable. Il existe plusieurs méthodes d'exploitation dont deux sont les plus utilisés,

l'exploitation à ciel ouvert et l'exploitation souterraine, l'exploitation à ciel ouvert est la méthode d'exploitation d'un gisement depuis une excavation créée en surface après avoir enlevé les matériaux stériles qui le surmontent, c'est la méthode privilégiée pour l'extraction des gisements situés près de la surface.

La figure suivante montre une mine à ciel ouvert, où on remarque plusieurs éléments la constituant : les gradins, les engins...

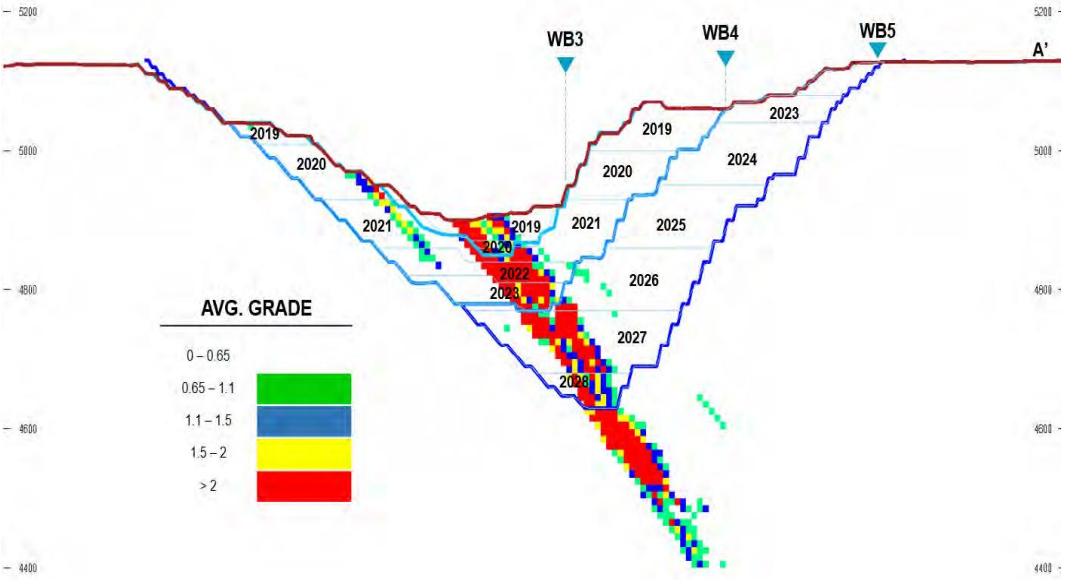


Figure27: West Branch Pushbacks Below End of December 2018 Topography Source: Mining department, TMLSA

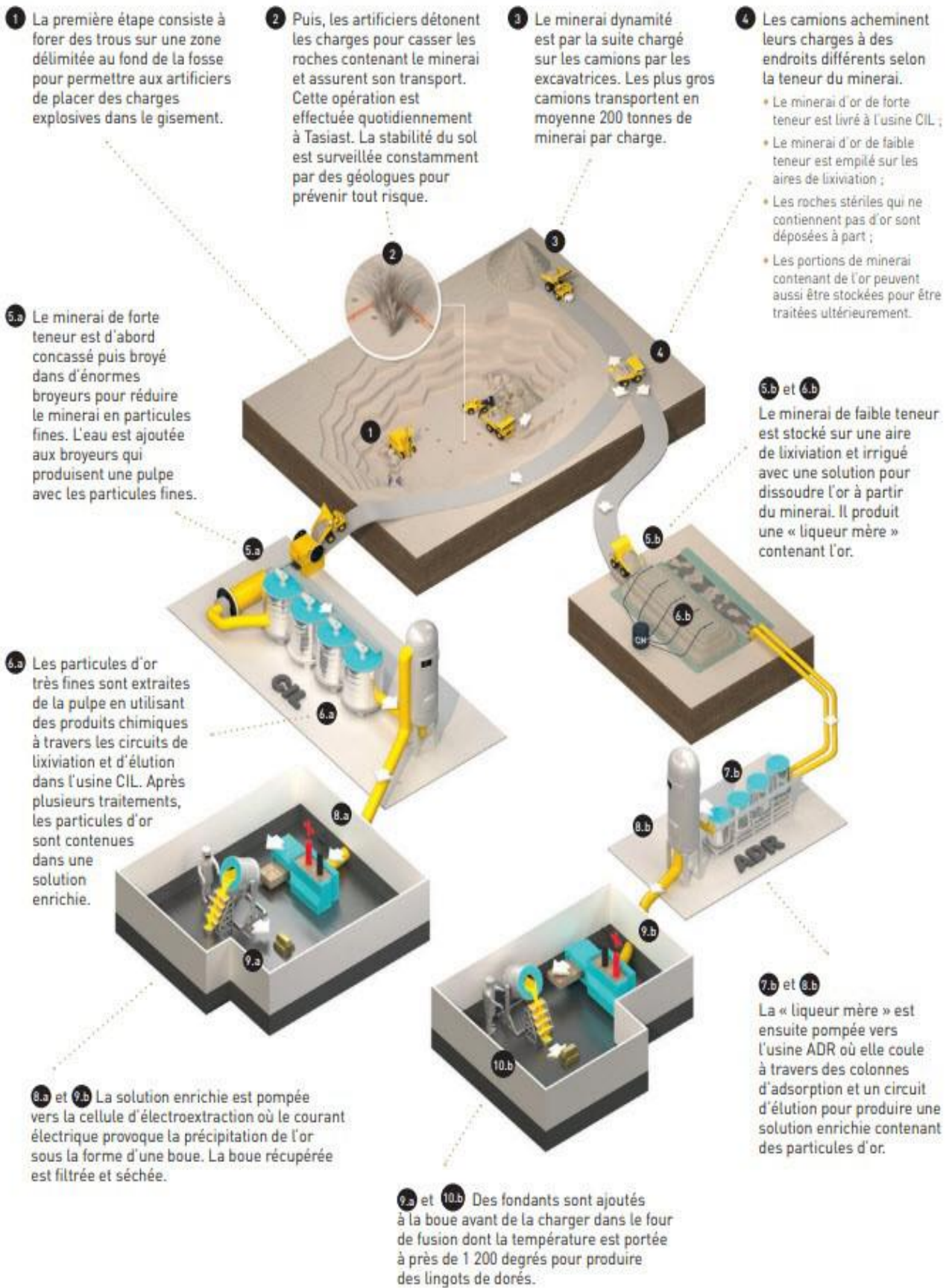


Figure 28: Flowsheet des opérations d'exploitation de la mine de Tasiast (Source: Mémoire de Mamadou Aliou Dia, 2014)

8 Usine de traitement CIL (Carbon in Leach)

Comme précédemment mentionné le minerai à forte teneur rentre dans la chaîne de traitement après son exploitation avec un ensemble des opérations : le concassage, le broyage, la séparation gravimétrique, l'épaississement, la lixiviation au cyanure, la récupération de l'or par le charbon activé, l'éluion du charbon suivie de l'électrolyse et la fusion de l'or.

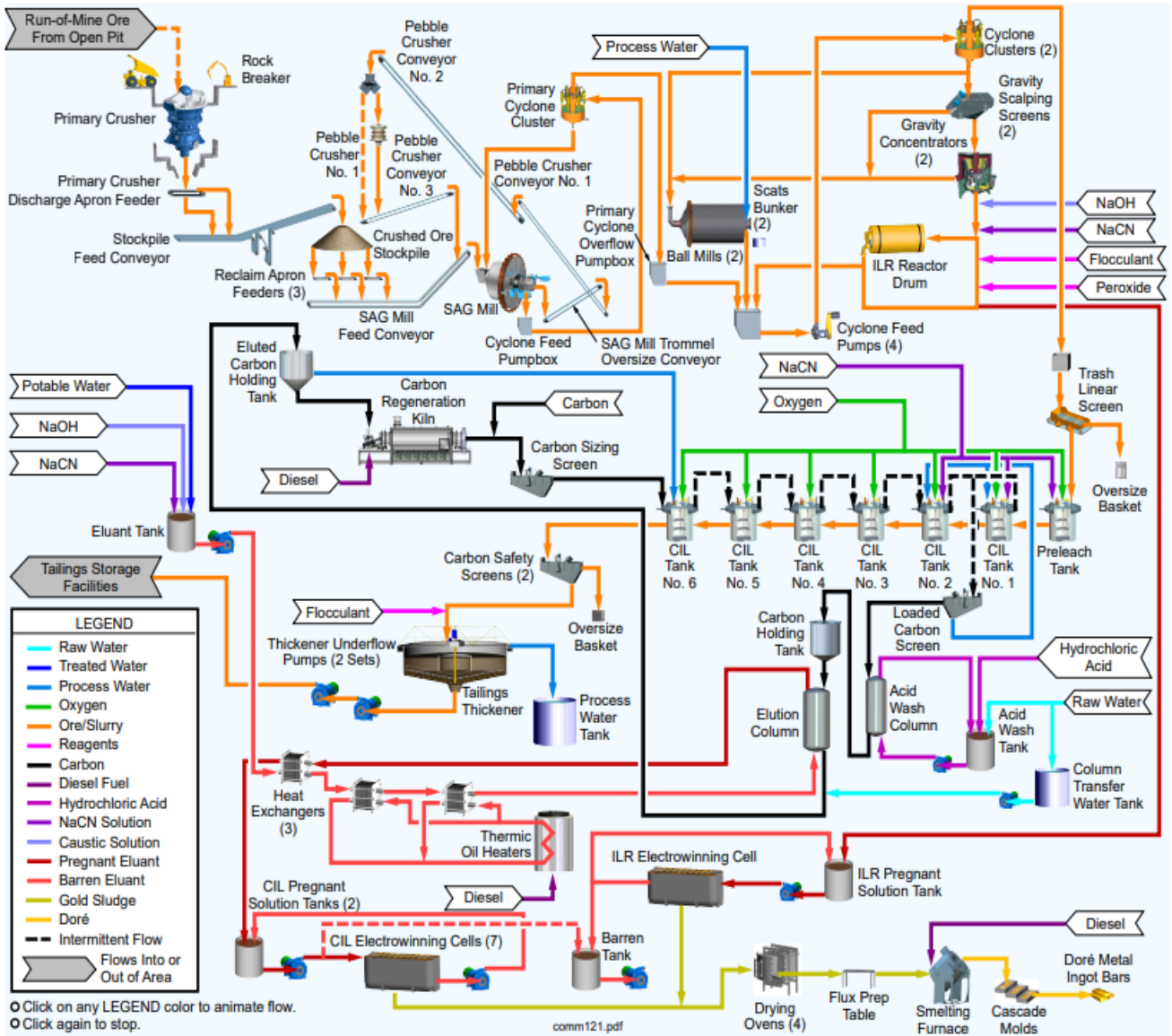


Figure 29: flowsheet des différentes étapes de traitement de la mine de Tasiast (Source: processing department, TMLSA)

8.1 Le concassage

Est la première étape de la préparation mécanique, elle consiste à réduire le minerai jusqu'à une taille de 10 mm (concassage tertiaire).

Les camions à benne basculante décharge le minerai sur une trémie, le minerai est tiré par un alimentateur à vitesse variable qui va alimenter à son tour le concasseur primaire ; le concasseur a une capacité de 390 tonnes par heure.

La nouvelle usine de TMLSA dispose de 3 concasseurs (le concasseur primaire, le concasseur secondaire et le concasseur tertiaire). Le concasseur primaire reçoit des blocs de 600 à 650 mm ensuite les réduits à une granulométrie de 150 mm, alors que le concasseur secondaire est alimenté par des particules de 150 mm et les réduits jusqu'à 30 mm, le concasseur tertiaire quant à lui il reçoit des particules de 30 mm et les réduits à son tour jusqu'à 10 mm qui sera envoyé au circuit de broyage.

L'image suivante montre les roches au moment du concassage ;

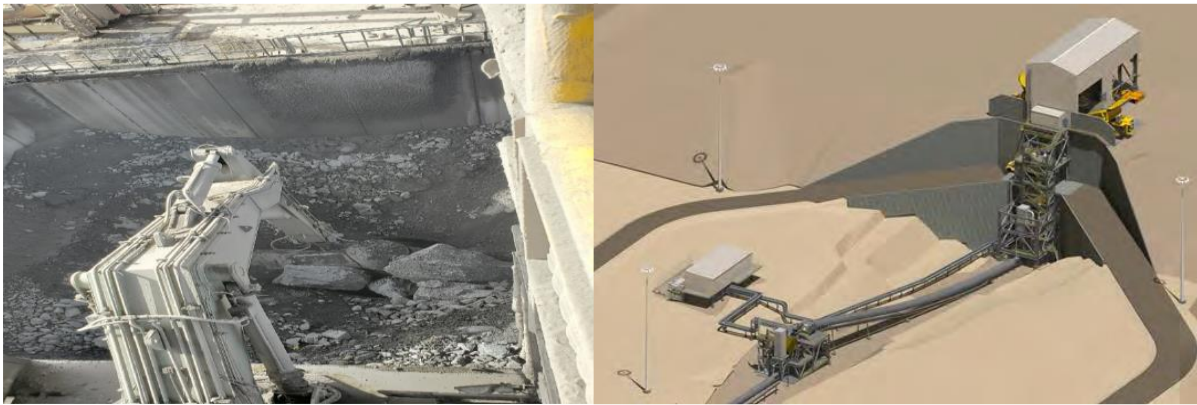


Figure30: Roche au moment du concassage (Source: processing department, TMLSA)

Figure31 : Concasseur première

8.2 Le broyage

Est la deuxième étape de la préparation mécanique, le minerai concassé est d'abord réduit par un broyeur semi-autogène (SAG MILL), le plus grand en Afrique avec une capacité de 64 000 m³/jour, ce broyeur est installé avec un tamis vibrant, la sur-verse du tamis est retourné par un convoyeur au broyeur pour être broyée de nouveau. La sous-verse du tamis est acheminée vers une boîte de pompage d'où elle est pompée vers un ensemble des cyclones pour être classifiée. La sur-verse des cyclones (fraction fine) est dirigée ensuite vers un tamis à rebuts pour éliminer les impuretés de la pulpe tel que les particules en bois, plastique. La sous-verse des cyclones (fraction grossière) est déplacée par gravité vers un broyeur à boulets (BALL MILL) pour être broyée plus finement. La déverse du broyeur est pompée à nouveau vers les cyclones pour être déclassifié. Les particules d'or en raison de leurs densités vont être concentrés dans la base des cyclones (sous-verse) et est dirigée au circuit de séparation gravimétrique pour récupérer les particules libérées d'or grossier.

La figure ci-après est une image du broyeur semi-autogène (SAG MILL) de Tasiast



Figure32: SAG MILL (Source: processing department, TMLSA)

8.3 Epaissement et Lixiviation

La sous-verse du tamis à rebuts est pompée vers un épaisseur (thickener) qui augmente la densité de la pulpe de 30 % à environ 50 % de solides, la sur-verse de l'épaisseur est envoyée au réservoir de solution pour rentrer de nouveau dans le circuit de broyage, alors que la sous-verse de l'épaisseur est pompé dans la première cuve (tank) du circuit de lixiviation au cyanure. Le circuit de lixiviation se caractérise par une série de cuves avec des agitateurs mécaniques à l'intérieur de chacune des cuves qui assurent le contact suffisant pour dissoudre l'or. De l'air comprimé est injecté dans chacune des cuves pour maintenir un niveau d'oxygène adéquat pour la cyanuration.

Dans les figures ci-dessous est représentée l'épaisseur ou thickener et le circuit de cyanuration ou lixiviation de l'usine de Tasiast ;



Figure33: Epaisseur ou thickener (Source: processing department, TMLSA)

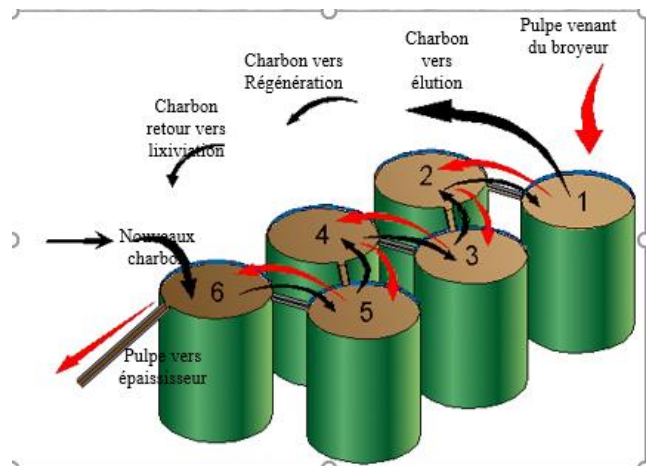


Figure34: circuit de lixiviation (Source: processing department, TMLSA)

8.4 Charbon en lixiviation (C.E.L)

Du charbon activé frais est ajouté dans la dernière cuve du circuit, le charbon est périodiquement déplacé dans le sens inverse de chacune des cuves pour récupérer les particules d'or de la cuve la plus riche jusqu'à la cuve la moins riche située en amont. La pulpe de la dernière cuve contenant du charbon chargé est pompée sur un tamis vibrant. Le charbon récupéré à la sur-verse du tamis est acheminé vers le circuit d'éluion du charbon.

8.5 Elution du charbon

Le circuit d'éluion du charbon se caractérise par un vaisseau de lavage à acide, un vaisseau d'éluion et des installations de réactivation du charbon, l'objectif principal de l'éluion est de récupérer l'or préservé dans les pores du charbon actif, la récupération de l'or sous la forme d'une boue résiduelle se fait par plusieurs étapes de traitement supplémentaires y compris l'électrolyse.

La figure qui suit explique l'étape d'éluion du minerai à Tasiast :

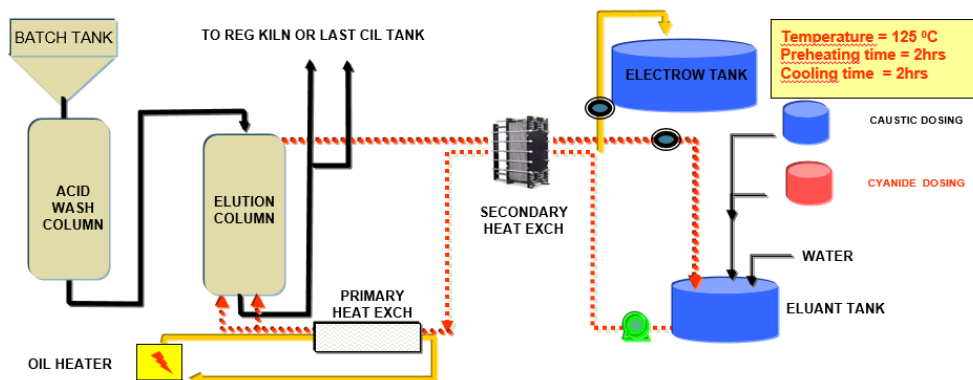


Figure35: circuit d'éluion (Source : processing department, TMLSA)

8.6 Electrolyse et raffinage

L'or contenu dans la solution d'éluion est récupéré par des cathodes d'une cellule d'électrolyse. La solution pauvre en or sortant de la cellule d'électrolyse est renvoyée vers le circuit d'éluion. Dès que les cathodes soient chargées en or, ils finissent par être retirées de la cellule d'électrolyse. L'or est ensuite raffiné dans un four (Gold Room) et fondu en lingots pour être exporté.

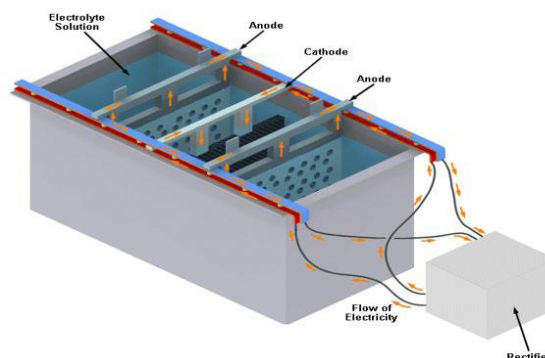


Figure36: circuit d'électrolyse (Source: processing department, TMLSA)

9 L'usine de traitement ADR (Adsorption, Désorption, Raffinage)

Le minerai à faible teneur en or de TMLSA est traité par lixiviation en tas (Heap Leaching), est un système simple qui consiste à dissoudre l'or du minerai déjà concassé et à produire une liqueur mère contenant de l'or à partir des arroseurs contenant du cyanure (figure 38). Ce modèle est conçu de sorte à pouvoir recueillir cette liqueur dans des bassins de récupération. Cette liqueur est traitée dans des colonnes de charbon afin d'absorber la quantité d'or contenu dans cette solution (Cyanure, or, chaux et d'autres éléments). TLMSA dispose de deux localités de lixiviation en tas, celui de piment et de West branche, ce dernier est le seul qui est utilisé actuellement. Enfin, la solution riche en or sera conduite via des tuyaux vers l'usine ADR pour suivre le même procédé de l'usine CIL.

La figure suivante est un flowsheet de la lixiviation en tas utilisée à Tasiast pour extraire l'or du minerai à faible teneur.

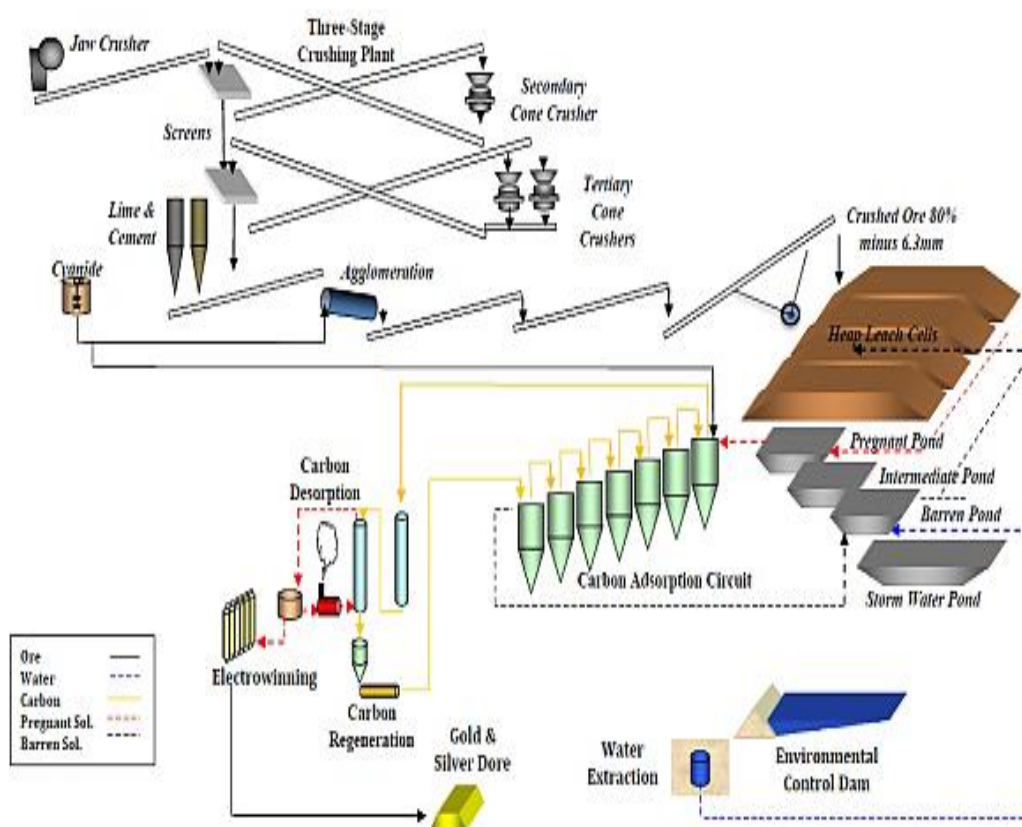


Figure37: flowsheet de la lixiviation en tas (Source: processing department, TMLSA)

CHAPITRE 4
Présentation et contexte du sujet d'étude

10 Présentation et contexte de sujet

Le transport est une activité primordiale dans de l'industrie minière, car cette activité est à la base de toute la production des matières premières qui alimentent les besoins du marché. Le transport de grandes quantités de minerais et de stériles dans les mines à ciel ouvert est un processus complexe et coûteux qui requiert un système de transport efficace et performant. Les coûts de transport sont un élément essentiel du coût global d'exploitation dans l'industrie minière. Selon des statistiques récentes, le transport de minerais peut représenter jusqu'à 60% des coûts d'exploitation d'une mine. Ces coûts peuvent être directs tels que le carburant, l'entretien des engins, les pneus et les chenilles ou indirects tels que le temps d'arrêt non planifié, les pertes de production et les réparations des engins etc.... Cependant, le coût de transport dans les mines exploitées par fosse est influencé par l'évolution de la profondeur de la fosse, ainsi que par la qualité des voies d'accès.

La mine de Tasiast utilise deux types de flottes de camions, une flotte de type Caterpillar785 (05 camions) et une flotte de type Caterpillar793 D (45 camions). Ce dernier type est formé par des camions très puissants et performants. Ces camions sont caractérisés par un poids à vide inégalé qui permet une charge utile optimisée et une durée de vie plus longue, même lors d'une utilisation intensive. Par conséquent, l'optimisation de la performance de cette flotte (productivité et temps d'utilisation) est cruciale pour réduire les coûts de transport dans la mine, ce qui en fait une priorité absolue.

10.1 Problématique

La mine de Tasiast a commencé une nouvelle extension ou push-back en début d'année 2023, ce qui signifie que pendant les deux prochaines années, l'exploitation se concentrera sur l'extraction de stériles sans accéder au minerai. Cela entraînera une consommation de fonds sans aucun retour sur investissement. Pour cette raison, l'équipe d'exploitation doit réduire ses coûts au minimum pour que la mine puisse surmonter cette période difficile. Étant donné que plus de 60% du budget d'exploitation est consacré à l'opération de transport minier, et que ces coûts augmenteront avec l'augmentation de la profondeur de la fosse, l'avancement de la verse de stérile et le vieillissement des équipements, il est impératif de réduire ces coûts au maximum tout en maintenant l'efficacité du transport. Cependant, toute optimisation de l'activité de transport doit commencer par l'optimisation de la performance de la flotte Caterpillar793 D, sur laquelle la mine s'appuie pour l'opération de roulage et de transport des matériaux extraits depuis la fosse jusqu'aux versements de stériles, les cellules de stockage de minerai ou le concasseur pour alimenter l'usine. De plus, la flotte Caterpillar793 D représente la part la plus importante des coûts de transport. Par conséquent, son optimisation en termes

d'utilisation, de productivité et d'efficacité est vitale. L'optimisation de la performance de la flotte Caterpillar793 D concerne les éléments suivants :

L'augmentation de la productivité de camions qui dépend de :

- La charge transportée par les camions (payload).
- La qualité des routes et de rampes de la mine
- Le temps de cycle du camion

L'augmentation de temps d'utilisation de camions qui dépend de :

- La gestion des délais opérationnels
- La gestion Standby time
- La gestion de temps de fonctionnement du camion

Qui est concerné par le problème ?	Département de la mine, service de chargement et transport.
C'est quoi le problème ?	Déficit de performance de la flotte CAT793 D
Où apparait le problème ?	Sur la production journalière et sur le budget de transport du minerai
Quand le problème se produit	Quotidiennement et il s'empire avec la nouvelle extension de la mine
Comment mesurer le problème ?	Analyser les données liées à La productivité (charge transportée, temps de cycle, vitesse de déplacement de camions) et temps d'utilisation de camions pour identifier ses causes.
Comment résoudre le problème ?	En identifiant le problème par la visite du terrain et l'analyse des données afin de donner des recommandations et les exécuter ultérieurement
Pourquoi le problème est survenu ?	Manque de contrôle et de supervision et l'absence d'étude approfondie sur le sujet.

10.2 Importance et criticité

Ce sujet traite l'optimisation de performance de la flotte des camions Caterpillar793 D, qui est un équipement incontournable pour toute optimisation de l'opération de transport minier. L'optimisation de la performance des camions miniers Caterpillar793 D est un moyen efficace d'augmenter leur productivité, de réduire les temps de cycle et d'augmenter leur temps d'utilisation en réduisant les délais opérationnels. En organisant et en suivant de près ces délais, nous pouvons nous assurer que le temps alloué soit respecté.

En optimisant ces différents facteurs qui affectent la performance des camions Caterpillar793 D, nous pouvons réduire considérablement les coûts de transport minier.

Les résultats obtenus ainsi que les recommandations formulées visant à résoudre cette problématique et à optimiser l'activité de la flotte de transport peuvent apporter une grande valeur économique pour la mine de Tasiast. En réduisant le budget annuel alloué au minage grâce à une gestion plus efficace du transport, l'entreprise pourra réaliser des économies substantielles. Cela se traduira par une plus grande marge de bénéfice lors de l'extraction de l'or, renforçant ainsi la rentabilité globale de l'opération minière.

De plus, en mettant en place des mesures d'optimisation de la flotte, telles que l'utilisation de cycles plus longs et la réduction des temps d'attente, la mine de Tasiast pourra non seulement améliorer ses performances financières, mais aussi réduire son empreinte environnementale. En réduisant les émissions de gaz à effet de serre associées au transport, l'entreprise contribuera à la préservation de l'environnement et à une exploitation plus durable des ressources.

10.3 Facteurs majeurs influençant la performance de Caterpillar793 D.

L'optimisation de la performance des camions Caterpillar793 D est influencée par plusieurs facteurs qui peuvent être regroupés en deux grandes catégories : ceux qui influencent la productivité et ceux qui influencent le temps d'utilisation.

10.3.1 Facteurs qui influencent la productivité des camions Caterpillar 793D

- ✓ La charge utile transportée par le camion celle-ci a un impact significatif sur sa productivité. Une charge optimale permet de maximiser la capacité de transport du camion tout en minimisant le temps de cycle. Si la charge est trop lourde, le camion peut être plus lent à accélérer et à monter les rampes, ce qui augmente le temps de cycle. Si la charge est trop légère, le camion ne sera pas utilisé à pleine capacité, ce qui diminue la productivité.
- ✓ La qualité de rampes : Les routes mal entretenues ou les rampes trop abruptes peuvent diminuer la productivité du camion. Une route mal entretenue peut entraîner des dommages au camion et augmenter les temps de cycle, tandis qu'une rampe trop abrupte peut ralentir le camion et augmenter sa consommation de carburant, ce qui diminue la productivité.
- ✓ Granulométrie et densité des matériaux chargés : La granulométrie et la densité des matériaux chargés sont des facteurs importants qui affectent la performance du Caterpillar 793 D. La granulométrie des matériaux chargés influe directement sur la vitesse de chargement de la pelle ou cycle time de pelle. En effet, plus la granulométrie est grande, plus il est difficile de remplir le godet de la pelle, ce qui peut augmenter le cycle time de la pelle et, par conséquent, le temps de chargement du camion. En outre, si la densité des matériaux est élevée, cela peut causer des problèmes pour le camion lui-même, car le poids transporté peut devenir difficile à déplacer, entraînant des temps de cycle plus longs. En fin de compte, cela peut affecter la productivité globale de la flotte de camions et augmenter les coûts de transport.

- ✓ Taux de remplissage du camion : Le taux de remplissage du camion est un facteur important qui affecte la productivité. Si le taux de remplissage est faible, le camion transportera moins de matériaux, ce qui entraînera une diminution de la productivité. Cependant, si le taux de remplissage est trop élevé, il peut causer des problèmes de sécurité en débordant sur les rampes et bloquant la circulation des engins et des personnes.
- ✓ Expérience des opérateurs de camions : L'expérience des opérateurs de camions peut avoir un impact sur la productivité et le temps d'utilisation. Les opérateurs expérimentés sont plus efficaces et peuvent accomplir plus de tâches en moins de temps. Une formation de qualité peut aider les opérateurs à comprendre les meilleures pratiques et à éviter les erreurs qui peuvent ralentir le processus.
- ✓ La maintenance préventive : une maintenance régulière permet d'optimiser la disponibilité du camion et de minimiser les temps d'arrêt non planifiés, ce qui augmente la productivité.

10.3.2 Facteurs qui influencent le temps d'utilisation des camions Caterpillar793D

- ✓ La qualité de rampes : Des rampes mal entretenues ou trop abruptes peuvent causer des problèmes pour les camions, tels que des pannes mécaniques et des temps d'arrêt prolongés. Si les rampes ne sont pas entretenues régulièrement, elles peuvent se dégrader et devenir difficiles à parcourir, ce qui peut augmenter le temps de trajet et réduire le temps d'utilisation des camions. De plus, si les rampes sont trop abruptes, les camions peuvent avoir du mal à les gravir, ce qui peut entraîner une surcharge des moteurs et des composants, ce qui peut à son tour causer des pannes et une réduction de la durée de vie des camions.
- ✓ Les conditions météorologiques : des conditions météorologiques défavorables peuvent réduire la vitesse de déplacement des camions et donc leur temps d'utilisation.
- ✓ Gestion inefficace des délais des opérateurs : Si les délais des opérateurs ne sont pas gérés efficacement, cela peut entraîner une perte de temps inutile et une réduction de la productivité globale.
- ✓ Manque de surveillance des délais : Si les délais ne sont pas surveillés de manière adéquate, les opérateurs peuvent dépasser le temps imparti, ce qui peut réduire la productivité.
- ✓ Qualité de la communication entre les différentes parties impliquées dans l'activité de transport minier : La qualité de la communication entre les différentes parties impliquées dans l'activité de transport minière.
- ✓ La disponibilité des camions est un facteur clé qui affecte le temps d'utilisation. Si les camions ne sont pas disponibles ou s'ils sont en panne, cela réduit le temps

d'utilisation des camions et peut causer des arrêts de production. Les camions doivent être disponibles pour être utilisés efficacement et pour assurer la continuité de la production. Cela nécessite une maintenance et un entretien appropriés pour minimiser les temps d'arrêt non planifiés.

10.3 Données de dispatch

Dispatch Fleet Management System (DFMS) est un système informatisé de gestion de flotte qui permet aux entreprises minières de suivre et de gérer leurs véhicules (camions, pelles, niveleuses, foreuses et bulldozers) et leur personnel en temps réel. Le système DFMS est conçu pour aider les entreprises à optimiser leurs opérations de transport et de logistique, en surveillant la localisation des véhicules, en suivant les temps de trajet et en gérant les tâches de maintenance et de réparation.

Les fonctionnalités d'un DFMS peuvent inclure des outils de planification des itinéraires, des outils de communication en temps réel entre les conducteurs et les responsables de la flotte, des rapports de performance de la flotte, des outils de gestion de carburant, et d'autres fonctionnalités utiles pour suivre et optimiser la productivité de la flotte.

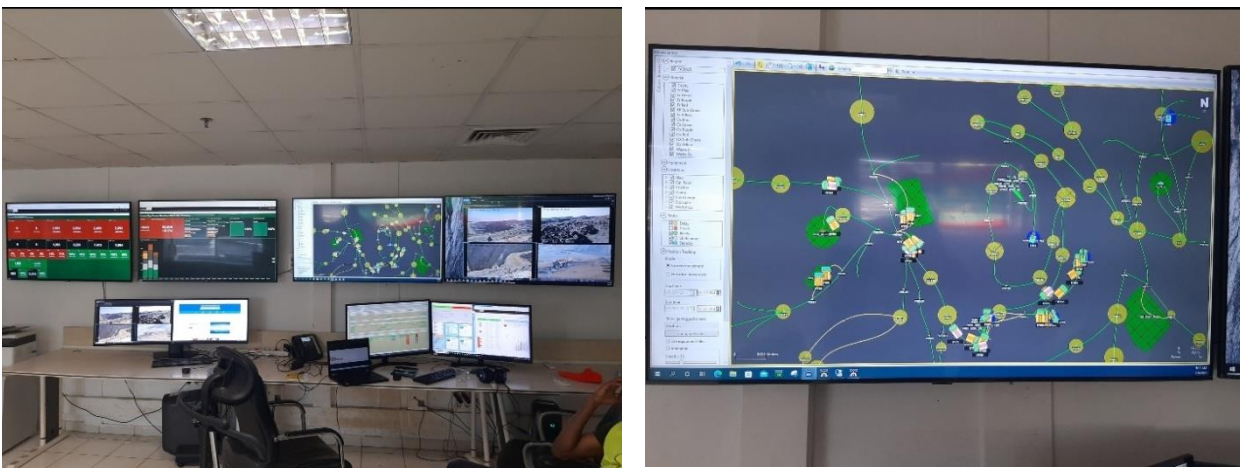


Figure38 : Système DFMS

Pour optimiser les performances de la flotte de camions 793D, on a utilisé les données collectées par DFMS, qui donne la productivité, le temps de cycle, la qualité des rampes et la vitesse de déplacement des camions. Ces données sont envoyées au système via des capteurs et des GPS installés dans les camions, qui mesurent toutes les données liées à la charge transportée, à la position du camion, aux secousses sur la rampe traversée par le camion, etc.

Toutes ces données collectées par le DFMS sont stockées dans une base de données appelée Connected Mine (CM), sous forme de rapports sur les indicateurs de performances de la flotte de camions. En analysant les données collectées par le DFMS et stockées dans la base de

données CM, on peut mieux comprendre les éléments ou les facteurs qui rendent le transport inefficace. Les décisions prises à partir de ces analyses permettent d'optimiser les opérations de transport et contribuent à augmenter l'efficacité et la rentabilité de la flotte de camions 793 D.

En utilisant les données de la productivité, du temps de cycle, de la qualité des rampes et de la vitesse de déplacement des camions collectées par le DFMS, on peut évaluer la quantité de travail accompli par chaque camion, identifier les points de blocage, améliorer l'efficacité de la chaîne de production, améliorer la sécurité en identifiant les rampes présentant des problèmes de qualité, optimiser les itinéraires pour réduire le temps de transport et améliorer l'efficacité énergétique. En utilisant un DFMS, les données collectées sont plus précises et fiables que celles obtenues à partir de chronomètres. De plus, ces données sont obtenues en temps réel en se basant sur la position du camion, ainsi que l'état de la pelle (en cours de chargement d'un camion ou non) et l'état de la benne du camion (en cours de déchargement ou non). Le système DFMS n'a pas besoin d'une intervention humaine pour calculer le temps de cycle, ce qui permet d'obtenir des données exactes et fiables.

En résumé, en analysant les données collectées, nous sommes en mesure de mieux comprendre les défis auxquels sont confrontées les opérations de transport et d'identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées pour optimiser la performance de la flotte. Cela peut se traduire par des réductions de coûts, une amélioration de l'efficacité et de la productivité, ainsi qu'une satisfaction accrue des clients grâce à des délais de livraison plus courts et des niveaux de service plus élevés.

10.4 Engins de transport

Le transport du matériau, depuis la fosse d'exploitation jusqu'aux lieux de déversement, constitue une étape importante dans le processus de production minière. Il peut s'effectuer soit en continu, par transporteurs à bandes (appelés aussi convoyeurs à bandes ou bandes transporteuses) soit en discontinu, au moyen des engins de transport communément appelés tombereaux ou dumpers. Le dernier processus est celui appliqué à la mine de Tasiast. Le transport des minerais et des stériles est effectué à l'aide de camions à grande capacité, notamment des Caterpillar 793D. La production se base sur l'utilisation de ce type de camions. Toutefois, une deuxième catégorie de camions, les Komatsu 785 d'une capacité de 85 tonnes, peut également être utilisée spécifiquement pour le transport des stériles. Les camions de la série 793D de Caterpillar sont des engins de transport à grande échelle, conçus pour le déplacement des matériaux dans les opérations minières à ciel ouvert. Ces camions sont réputés pour leur capacité de charge élevée et leur puissance. Ils sont équipés d'un moteur diesel performant, offrant une puissance suffisante pour transporter des charges lourdes sur de longues distances. Ces camions sont équipés de technologies avancées pour améliorer la productivité et la sécurité. Ils peuvent être équipés de systèmes de commande automatique pour optimiser les performances de conduite et minimiser les risques d'accidents. De plus, ils

sont équipés de systèmes de surveillance et de gestion de flotte, permettant un suivi précis des performances et une planification efficace des opérations minières.

En résumé, la flotte de camions Caterpillar 793D utilisée dans la mine de Tasiast est une gamme de camions puissants, durables et dotés de technologies avancées, spécialement conçus pour répondre aux exigences du transport minier à grande échelle.

10.5 Caractéristiques et dimensionnements des camions 793D

Tableau 1 Caractéristiques des camions 793D

Caractéristiques	Valeurs
Réservoir de carburant	4922 l
Diamètre de dégagement pour le braquage	33 m
Angle de braquage	36°
Charge utile nominale	226.8 T
Vitesse maximale, en charge	60.0 km/h

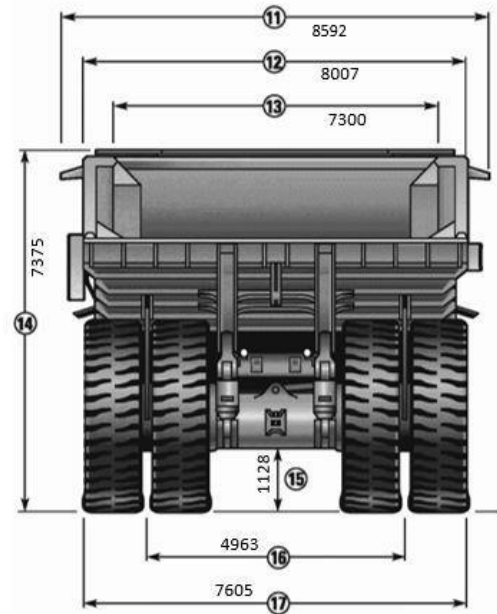


Figure 39 : Dimensionnements des camions 793D

Dans la mine de Tasiast, cette flotte est la principale flotte utilisée pour la production minière. Cette flotte se compose de 46 camions au total, dont 8 camions ont une capacité de 235 tonnes, tandis que les autres camions ont une capacité de 220 tonnes.

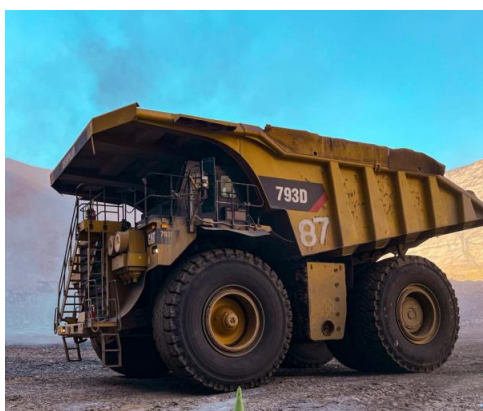


Figure 41 : Camion de capacité 220T



Figure 40 : Camion de capacité 235T

10.6 Analyses, Interprétations et Recommandations

10.6.1 Utilisation

L'utilisation est le temps disponible pendant lequel l'équipement est en cycle de production et n'est pas retardé pour une raison liée à son fonctionnement.

Tableau 2 variation de l'utilisation réalisé par rapport à l'utilisation à celle planifié

Mois	PI Flt % Utilisation	% Utilisation	variation
2022-Sep	75,84%	75,11%	-0,73%
2022-Oct	77,58%	77,81%	0,23%
2022-Nov	75,74%	75,77%	0,03%
2022-Dec	74,13%	77,83%	3,70%
2023-Jan	74,37%	79,75%	5,38%
2023-Feb	73,25%	72,46%	-0,79%
2023-Mar	77,57%	68,74%	-8,83%
2023-Apr	62,85%	57,38%	-5,47%
2023-May	79,52%	74,03%	-5,49%
2023-Jun	78,26%	72,84%	-5,42%
2023-Jul	76,14%	73,63%	-2,50%
2023-Aug	74,49%	70,45%	-4,03%
2023-Sep	75,84%	67,54%	-8,30%

Le taux d'utilisation planifié pour chaque mois varie de 67% et 79% de Septembre 2022 à Septembre 2023. Durant le mois janvier, le taux d'utilisation les camions est de 74% ce qui représente un écart positif de 5% par rapport au plan annuel. L'utilisation des camions durant les mois de septembre, février et juillet, a commencé à diminuer par rapport au plan. En Mars, le taux d'utilisation des camions a chuté vers 68%, soit un écart de 8% par rapport au plan annuel.

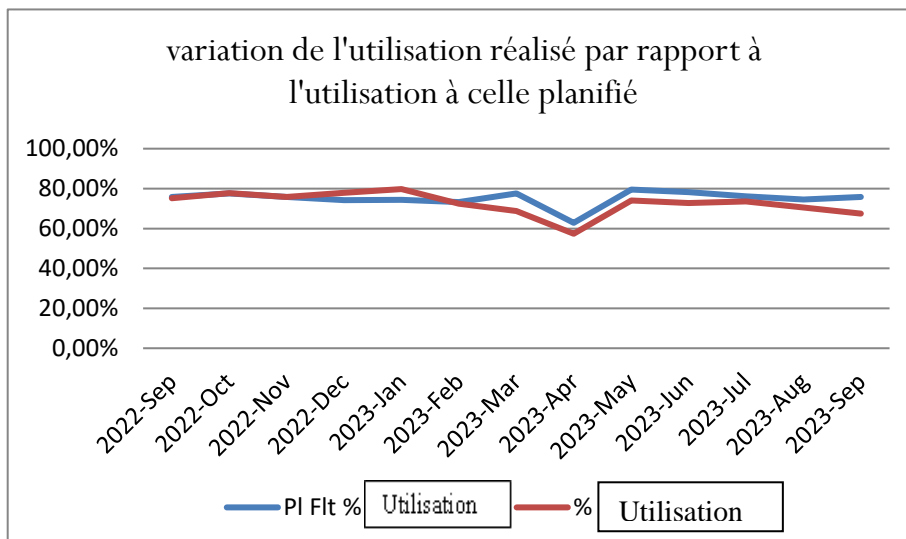


Figure42 : Variation de l'utilisation réalisé par rapport à l'utilisation à planifié

Pour identifier les délais des rotations et leurs influences sur l'utilisation, on réalise un diagramme *Pareto* pour les différents standbays et operating Delay(Fig43).

10.6.1.1 Standby

Standby est le temps total pendant lequel l'équipement est mécaniquement capable de fonctionner mais ne fonctionne pas en raison d'événements incontrôlables et/ou de durée inconnue.

Tableau 3 Variation de Operating standby

Operating standby	45 716,3t /min
313 - NO LOADING UNITS	16 249,3
315 - RAMADAN	7 453,5
317 - FRIDAY PRAY	6 883,9
312 - WEATHER	5 821,9
308 - RETURN FROM MAINTENANCE	3 543,9
318 - SHIFTCHANGE	2 506,7
307 - NO OPERATOR	2 341,3
304 - HOLIDAY	500,6
309 - OPPORTUNE MAINTENANCE	245,8
301 - EMERGENCY	85,7
UNKNOWN - Unknown time code	60,8
302 - EQUIPMENT NOT NEEDED	13,6
311 - STRIKE	3,5
314 - NO TRUCKS	3,4
306 - NO OPERATOR (MINE PROJECT)	1,2
303 - GEOTECHNICAL	1,2
319 - NO OPERATOR (COVID)	0,0

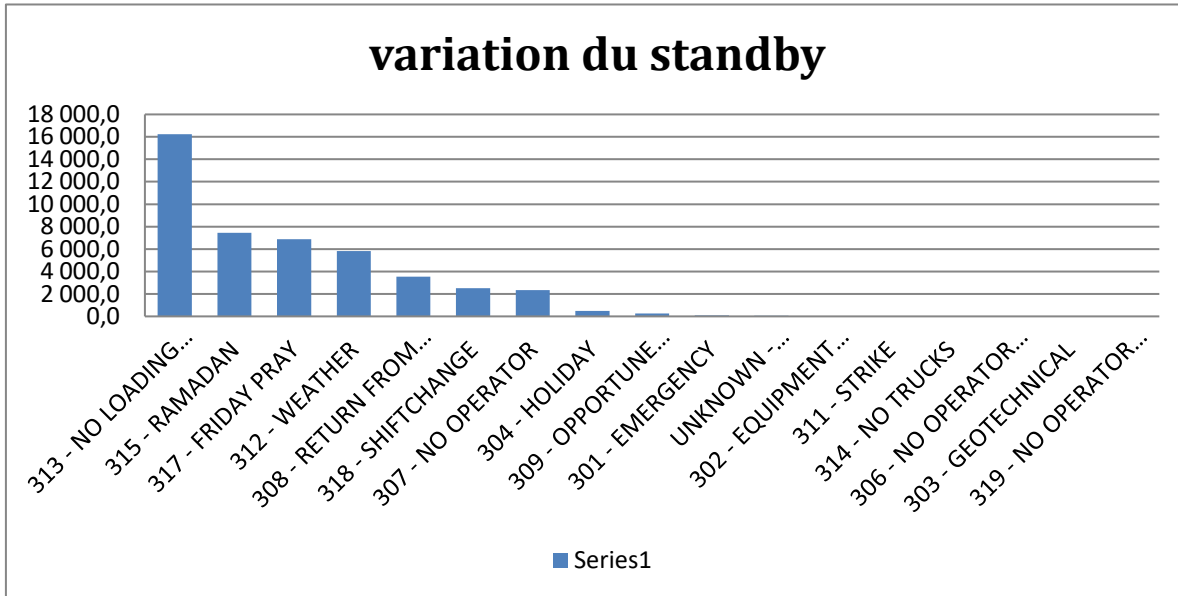


Figure43 : Pareto Operating Standby

Ce diagramme montre les paramètres qui prennent 80% de temps total de Standby sont

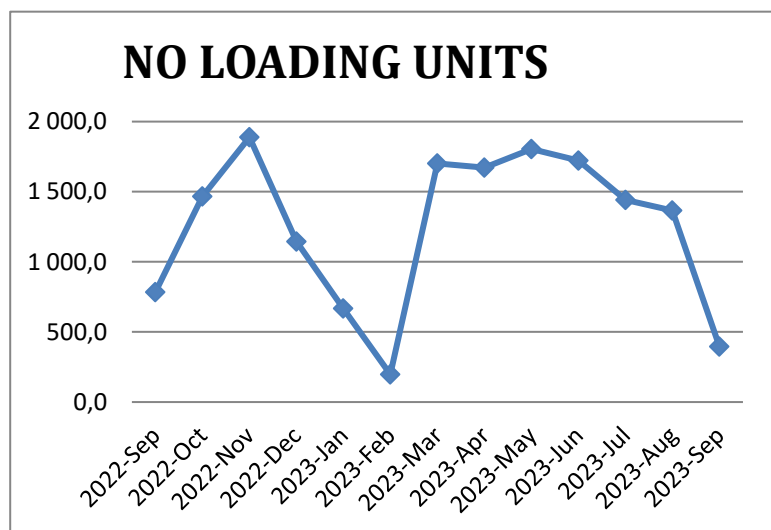
- NOLOADING UNITS(**Aucune unité de chargement**)
- FRIDAY PRAY(**la prière de du vendredi**)
- WEATHER(**Météo**)
- RETURN FROM MAINTENANCE(**Retour de maintenance**)
- SHIFTCHANGE(**Changement de poste**)

10.6.1.1 Noloading Units(Aucune unité de chargement)

Ce code est utilisé lorsque les camions sont disponibles mais ne sont pas utilisés dans la production en raison du manque d'engins de chargement pour les charger.

Tableau 4variation de no loading units

Mois	NO LOADING UNITS
2022-Sep	782,7
2022-Oct	1 466,9
2022-Nov	1 888,0
2022-Dec	1 144,6
2023-Jan	667,1
2023-Feb	197,3
2023-Mar	1 700,8
2023-Apr	1 671,1
2023-May	1 804,6
2023-Jun	1 723,0
2023-Jul	1 442,2
2023-Aug	1 366,5
2023-Sep	394,5



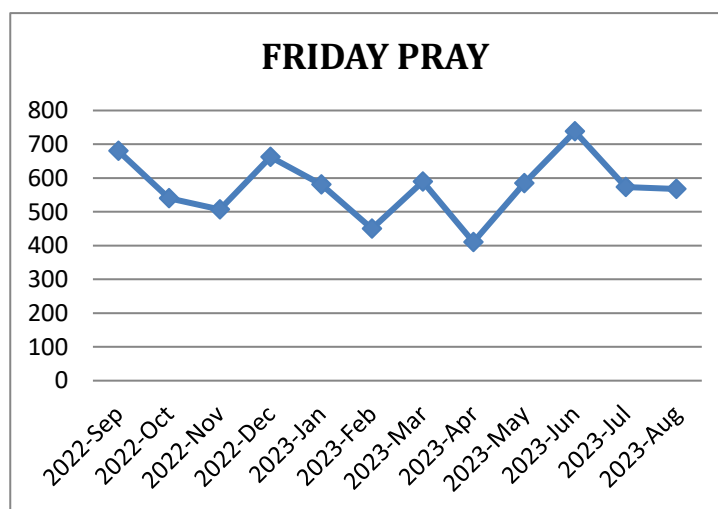
Les graphiques montrent que pendant les mois de Nov, Mar, Apr, May, Jun, le paramètre "no loading unit" avec un nombre total de 1800 Fréquence. En revanche, pour le mois de Dec, Jan, Fev et Sep, le nombre d'occurrences était significativement moins élevé que celui des autres mois. La solution pour éviter que les camions ne restent inutilisés en raison du manque de pelles pour les charger consiste à maintenir un cycle plus long afin d'utiliser au maximum les camions et de déverser les matériaux le plus loin possibles dans les zones prévues à cet effet. Un cycle plus long nous permettra d'utiliser au maximum les camions avec une seule pelle lorsque les pelles sont insuffisantes pour charger tous les camions.

10.6.1.1.2 Friday pray (la prière de du vendredi)

Ce code est utilisé lorsque l'opérateur n'est pas disponible pour effectuer la prière du vendredi. Il est attribué à une durée de 5 heures pour tenir compte du temps nécessaire à la prière et aux activités associées.

Tableau 5 variation de friday pray

Mois	FRIDAY PRAY
2022-Sep	680,2
2022-Oct	540,6
2022-Nov	506,8
2022-Dec	662,1
2023-Jan	580,5
2023-Feb	450,2
2023-Mar	589,3
2023-Apr	410,4
2023-May	584,8
2023-Jun	737,9
2023-Jul	573,3
2023-Aug	567,9



La Figure 46 montre que pendant la période étudiée, la durée moyenne de la prière du vendredi n'a pas dépassé la limite prévue pour ce délai. De plus, on observe que le mois de Feb présente la durée moyenne la plus basse par rapport aux autres mois. Cela s'explique par

le fait qu'il y avait seulement 4 vendredis ce mois-là, contrairement aux autres mois qui en comptaient 5. Cependant, en Apr, le mois du Ramadan, tous les camions qui étaient mis en attente étaient répertoriés sous le code du Ramadan.

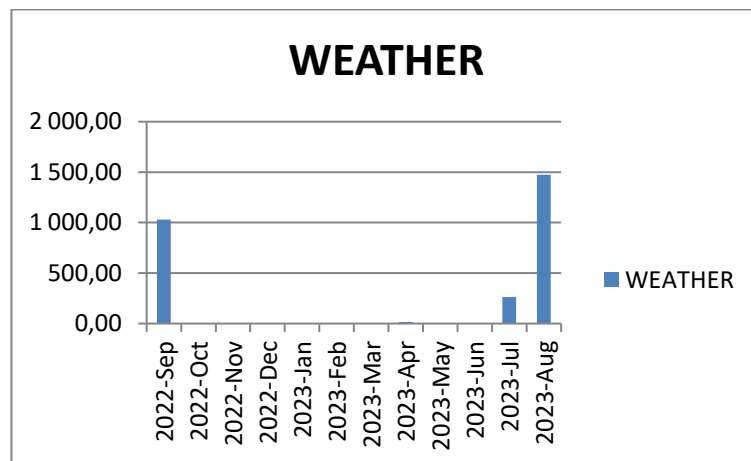
Pour les mois de Mai et juin, on remarque que la durée moyenne a augmenté et atteint son maximum par rapport aux autres mois, tout en restant en deçà de la limite de 5 heures.

10.6.1.1.3 Weather (Météo)

Le code "Weather" est utilisé lorsque les conditions météorologiques empêchent la réalisation des activités prévues. Il est utilisé pour signaler que les conditions météorologiques défavorables, telles que le vent, la pluie ou d'autres phénomènes météorologiques extrêmes, rendent impossible ou dangereuse la poursuite des opérations habituelles.

Tableau 6 Variation de weather

Mois	WEATHER
2022-Sep	1 030,00
2022-Oct	0,1
2022-Nov	
2022-Dec	1
2023-Jan	
2023-Feb	0
2023-Mar	
2023-Apr	13,6
2023-May	6,2
2023-Jun	
2023-Jul	263
2023-Aug	1 473,50



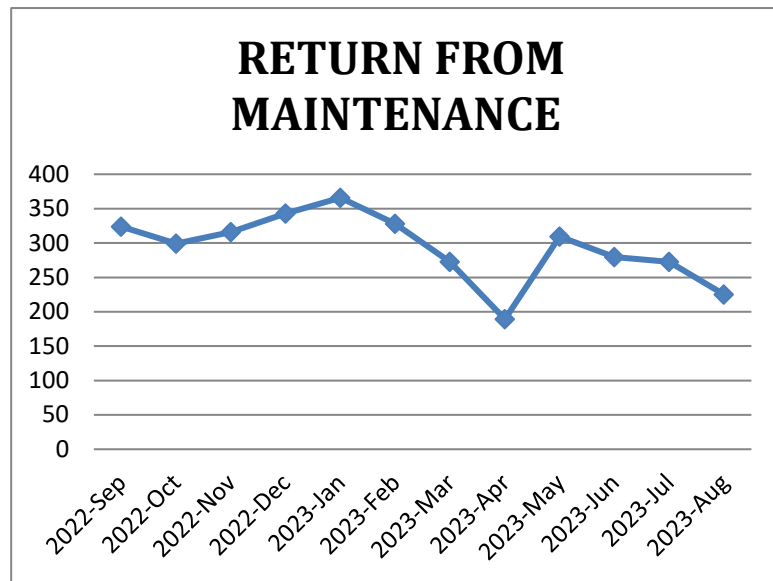
D'après ces graphes on constate que pendant le mois de février ce code a pris en moyenne environ 10 heures et un nombre d'occurrence cela est due à l'abondance de la Vent durant ce mois.

10.6.1.1.4 Return from maintenance(Retour de maintenance)

Equipment has been returned from Maintenance (i.e. to the Ready Line) but does not yet have an operator

Tableau 7 variation de return from maintenance

Mois	Return from maintenance
2022-Sep	323,7
2022-Oct	299,1
2022-Nov	315,7
2022-Dec	343
2023-Jan	365,8
2023-Feb	327,8
2023-Mar	272,4
2023-Apr	189,3
2023-May	309,4
2023-Jun	279,7
2023-Jul	272,7
2023-Aug	225,2



10.6.1.1.5 Shiftchange(Changement de poste)

Ce code est utilisé pour représenter le moment où les opérateurs effectuent un changement de poste. Il est attribué à une durée de 15min. Il est utilisé pour indiquer que les membres de l'équipe ou les opérateurs en service terminent leur quart de travail et sont remplacés par une nouvelle équipe.

Tableau 8 Variation de shiftchange

Mois	SHIFTCHANGE
2022-Sep	381,3
2022-Oct	368,7
2022-Nov	146,7
2022-Dec	165,8
2023-Jan	243,9
2023-Feb	120,9
2023-Mar	113,9
2023-Apr	57,1
2023-May	213,2
2023-Jun	223,6
2023-Jul	245,1
2023-Aug	179,6

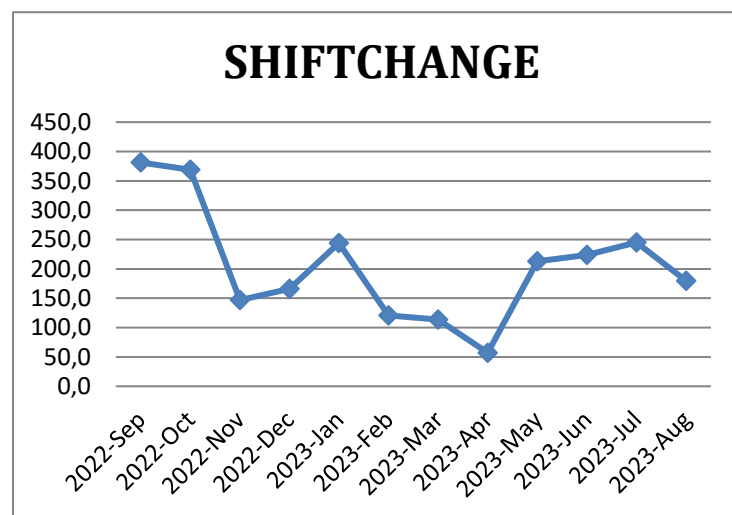


Figure 44 Shiftchange

10.6.1.2 Operating Delay

Retards pendant une période de travail qui sont contrôlables, à la fois planifiés et non planifiés, qu'ils soient de durée connue ou inconnue.

Ci-dessous, le diagramme *Pareto* que nous avons réalisé pour mettre en évidence les Operating Delay.

Tableau 9 Variation effectuée pour les operating delay

Grand Total	79 137,9 T/min
415 - PRAYER	8 688,2
418 - BLASTING	5 739,9
416 - MEAL	4 146,5
412 - FUELING	3 750,6
435 - Wait - Crusher	2 802,5
406 - CHANGE OPERATOR	2 465,2
414 - PERSONAL BREAK	2 331,4
411 - OPERATOR INSPECTION	1 252,8
413 - Late Start	792,2
436 - ROAD OBSTRUCTION	502,9
421 - INSPECT WORK AREA	324,4
410 - MEETING	278,2
428 - COOL TIRES	250,6
409 - MEET WITH SUPERVISOR	56,8
408 - INCIDENT INVESTIGATION	31,6
405 - LUBE	5,0
407 - LONG SHOVEL MOVE	1,1
404 - WAIT - SURVEY	0,7
403 - WAIT - SUPPLIES	0,4
429 - FACE CLEANUP	0,3
427 - WATER	0,2
420 - SHORT MOVE	0,1
423 - OPERATING MATERIAL CHANGE	0,0

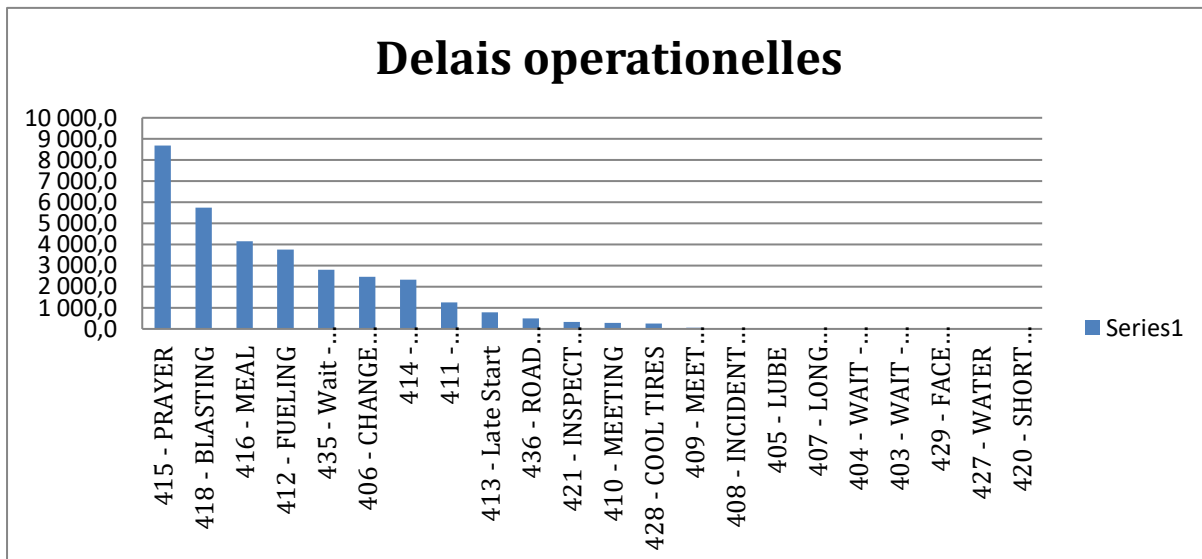


Figure45 : Pareto Operating Delay

Le diagramme de la figure 45, montre les paramètres qui prennent 80% de temps total des Operating delays qui sont :

- PRAYER(**Prière**)
- BLASTING(**Dynamitage**)
- MEAL(**Repas**)
- FUELING (**Ravitaillement**)
- WAIT-CRUSHER(**Concasseur d'attente**)

10.6.1.2.1 Prayer(Prière)

Ce code est utilisé lorsque l'opérateur va prendre une pause pour la prière, il est attribué à une durée de 15 minutes.

Tableau 10 Variation de prayer

Mois	PRAYER
2022-Sep	619,6
2022-Oct	621,1
2022-Nov	676,9
2022-Dec	687,1
2023-Jan	821,2
2023-Feb	646,1
2023-Mar	680,3
2023-Apr	532,8
2023-May	775,1
2023-Jun	830,3
2023-Jul	820,1
2023-Aug	789,9

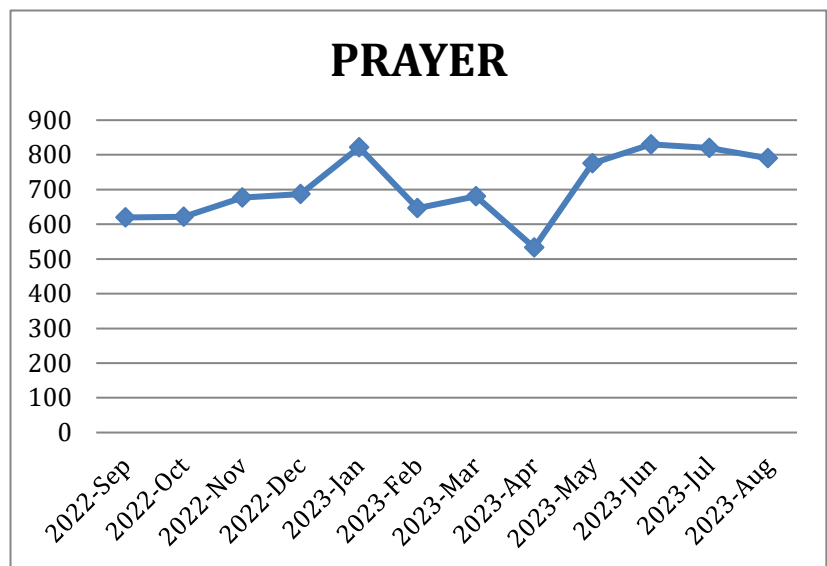


Figure 46 : prayer

En examinant les graphiques 46, on constate que pour les mois de janvier et février, le code "prayer" a atteint en moyenne 15 minutes, ce qui correspond à sa cible 600. Cependant, à partir du mois de mars, il dépasse sa limite. En ce qui concerne le nombre de fréquences, il diminue pendant le mois d'avril. Cette diminution peut être due au mois de Ramadan, où les opérateurs utilisent probablement le code "ramadan" au lieu du code "prayer".

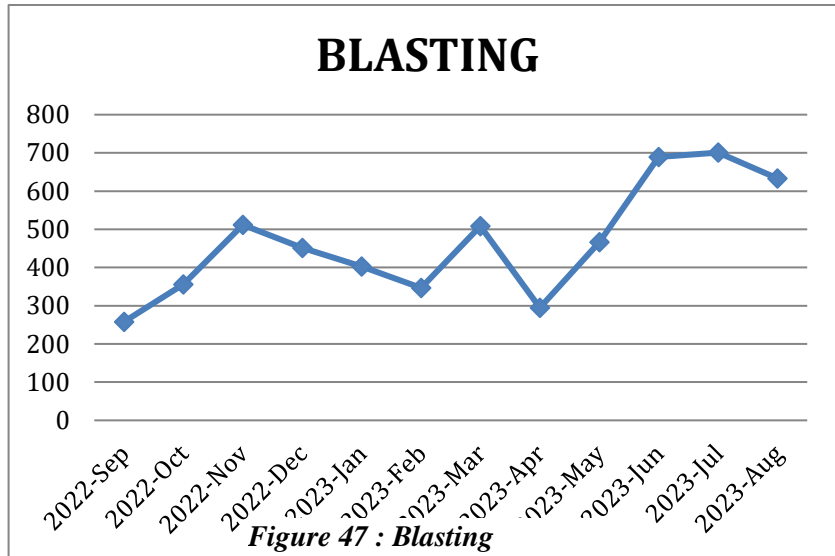
La situation actuelle concernant l'utilisation de ce code est la suivante : lorsque l'opérateur souhaite effectuer sa prière, il se rend au "go-line", un endroit situé à proximité de la fosse où les opérateurs prennent leurs pauses. Il y a également un parking réservé aux camions. Lorsque l'opérateur souhaite prier, il se rend au go-line, puis il active le code correspondant et descend du camion pour faire sa pause.

10.6.1.2.2 Blasting(Dynamitage)

Ce code est utilisé lorsque les équipements doivent se déplacer vers l'extérieur de la zone menacée par le tir. Ce code est attribué à une durée d'une heure de temps pour chaque tir.

Tableau 11 Variation de blasting

Mois	BLASTING
2022-Sep	258
2022-Oct	356
2022-Nov	512
2022-Dec	451,2
2023-Jan	402,5
2023-Feb	346,8
2023-Mar	507,9
2023-Apr	294,8
2023-May	466,2
2023-Jun	689,6
2023-Jul	700,7
2023-Aug	633,2



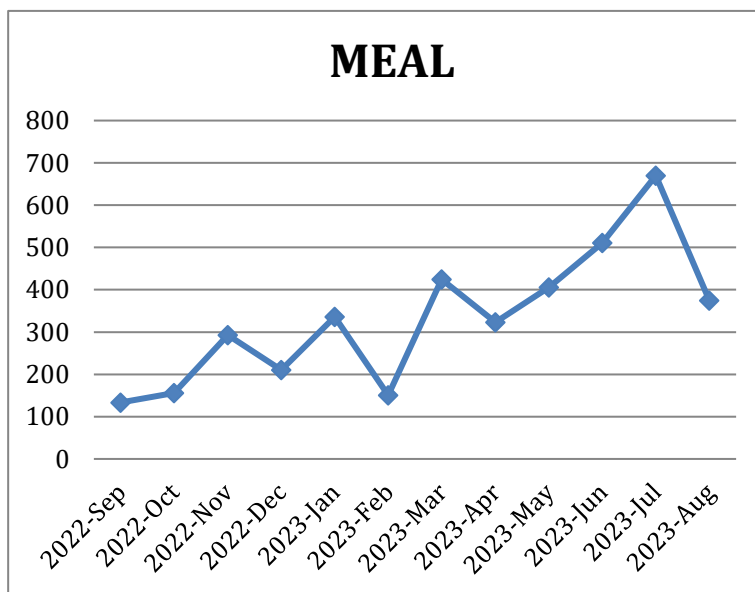
En observant ces graphes nous pouvons constater que ce code ne dépasse pas sa Target 700 en moyenne

10.6.1.2.3 Meal(Repas)

Ce code est utilisé lorsque l'opérateur prend une pause pour le repas. Il est attribué à une durée de 40 minutes.

Tableau 12 Variation de meal

Mois	MEAL
2022-Sep	133,5
2022-Oct	156,1
2022-Nov	292,8
2022-Dec	210,2
2023-Jan	336,3
2023-Feb	150,8
2023-Mar	424,7
2023-Apr	322,9
2023-May	405,4
2023-Jun	510,8
2023-Jul	669,9
2023-Aug	374,6



En analysant ces graphiques on remarqué que pour les mois de Mar, May,Jun et jul, la durée moyenne de ce code dépasse la cible fixée, entraînant une perte de temps. Cette augmentation du temps consacré aux pauses repas a un impact financier significatif, se traduisant par une perte Il est crucial de trouver des moyens d'optimiser ce temps afin de réduire les pertes d'argent associées aux pauses repas prolongées.

10.6.1.2.4 Fueling(Ravitaillement)

Ce code est utilisé lorsque le camion ne travaille pas pour la production en raison de mettre du carburant. Ce code est attribué à une durée de 15min.

Tableau 13Variation de fueling

Mois	FUELING
2022-Sep	398,5
2022-Oct	413,5
2022-Nov	381,6
2022-Dec	331,4
2023-Jan	293,5
2023-Feb	226,5
2023-Mar	272,4
2023-Apr	195,2
2023-May	249,5
2023-Jun	306,7
2023-Jul	317,9
2023-Aug	299

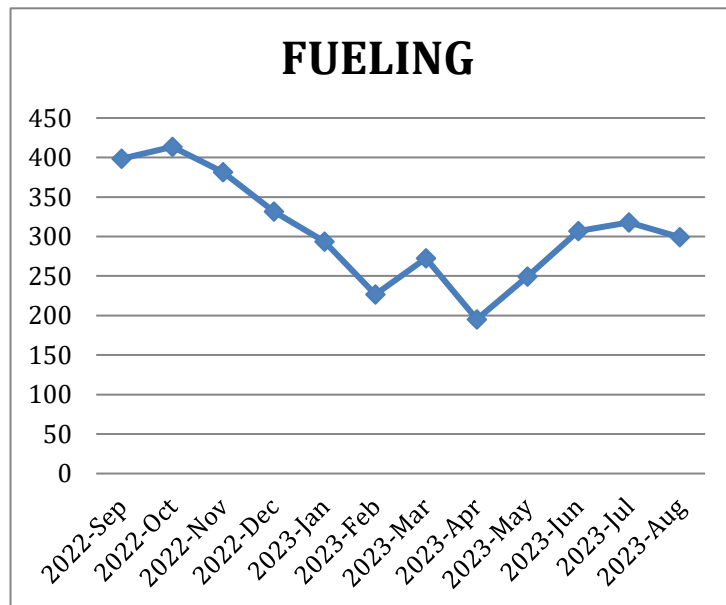


Figure:49 Fueling

En analysant ces graphiques, on constate que la durée moyenne de ce paramètre est généralement supérieure à la cible de 15 minutes, à l'exception du mois de février. Le mois de mars présente la durée moyenne maximale parmi les 12 mois, avec une moyenne de 16 minutes et 12 secondes.

La procédure actuelle pour effectuer le remplissage en carburant est la suivante : l'opérateur se rend au point de chargement du carburant, positionne le camion, descend du camion pendant le ravitaillement, et si le réservoir est plein, l'opérateur retourne dans le camion.

Pour réduire ce temps et minimiser les pertes financières, nous suggérons que l'opérateur reste à l'intérieur du camion pendant le ravitaillement. Cela permettra d'économiser du temps en évitant les déplacements de l'opérateur à l'extérieur du camion

10.6.1.2.5 Wait-crusher(Concasseur d'attente)

L'équipement est en attente car le concasseur est en panne en cours de nettoyage.

Tableau 14 Variation de wait crusher

Mois	Wait Crusher
2022-Sep	151,2
2022-Oct	252,4
2022-Nov	208,6
2022-Dec	282,8
2023-Jan	225,4
2023-Feb	27,4
2023-Mar	151,5
2023-Apr	175,2
2023-May	192
2023-Jun	270,1
2023-Jul	354,8
2023-Aug	384,3

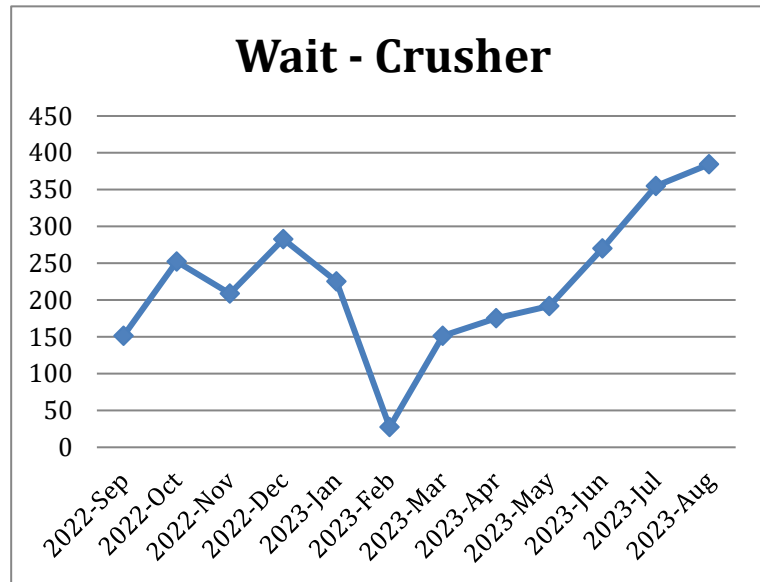


Figure 50 : Wait-Crasher

En analysant ces graphiques, on constate que la durée moyenne de ce paramètre est généralement supérieure à la cible de 7 minutes, à l'exception du mois de février. Le mois de mars présente la durée moyenne maximale parmi les 12 mois, avec une moyenne de 25 minutes.

CHAPITRE 5 : Recommandations

11 Recommandations

En se basant sur l'évaluation de la situation actuelle et l'analyse des résultats obtenus, nous avons présenté des recommandations visant à améliorer le rendement la productivité.

11.1 Maximisation de la charge utile :

- Limiter, dans la mesure du possible, le surchargement (le chargement en top loading) ;
- Dans le cadre d'un conflit entre les dispatcheurs de production, qui souhaitent augmenter les temps d'utilisation des équipements, et les dispatcheurs de maintenance, qui cherchent à réduire les temps d'indisponibilité, nous avons remarqué que toutes les pannes des camions causées par des surcharges ne sont pas enregistrées dans l'historique de maintenance. Nous suggérons au responsable de maintenance et de production de créer un rapport manuel qui répertorie toutes les pannes des camions dues à l'effet de surcharge, en incluant une description expliquant la raison de chaque panne.
- Résoudre le problème des réseaux et les problèmes de la charge incorrecte affichée par certains camions pour éviter la surcharge et la sous-charge, et donner la chance au pelleteur de savoir la charge qu'il a mise en temps réel dans le camion.
- Fournir un rapport quotidien qui indique aux opérateurs de pelles les nombres optimaux de godets qu'ils doivent charger dans les camions en fonction des terrains à exploiter (lithologie et degré d'altération) afin d'éviter les surcharges et les sous-charges, dans le cas où le système ne parvient pas à afficher les charges qu'ils ont mises dans les camions.
- Évaluer après chaque poste de travail la distribution de charge utile afin de s'assurer que la distribution recommandée de 10-10-20, préconisée par Caterpillar, est respectée.

11.2 Réduction du temps de positionnement

- Évaluer mensuellement les opérateurs des camions en fonction de leur temps de positionnement, puis fournir une formation aux opérateurs qui prennent plus de temps afin de les sensibiliser aux bonnes pratiques de positionnement.
- Envisager l'utilisation du système CaterpillarDetect pour aider les opérateurs des camions à réaliser un meilleur positionnement et accroître la sécurité.
- La préparation du premier godet doit être faite à temps et priorisée sur la préparation du matériel supplémentaire si un camion est disponible.

- L'opérateur du camion doit être en position de marche arrière pendant la préparation du premier godet.

11.3 Réduction du temps de chargement :

- Motiver les opérateurs de pelles et les évaluer en utilisant le taux de chargement potentiel dans la zone correspondante et afficher leur classement durant les postes de travail dans le but de créer une compétition positive entre eux.
- Assigner les meilleurs opérateurs pour les zones les plus difficiles et les plus hautes priorités.
- Afin d'évaluer les opérateurs de pelles en fonction de leur temps de chargement, il est nécessaire de mesurer ce temps en excluant le temps de repositionnement des opérateurs de camions, car cela a un impact sur la durée totale du chargement.
- Renforcement de la collaboration et de l'esprit d'équipe entre les opérateurs de pelles et de camions afin de faciliter les opérations de chargement, garantissant ainsi une meilleure position du camion pour aider le pelleteur à charger efficacement son camion.

11.4 Réduction du temps d'attente à la pelle :

- Pendant la période de tir et de transition entre les postes de jour et de nuit, arrêter les camions vides à proximité des pelles et d'autres emplacements proches de la fosse afin d'éviter les files d'attente lors du redémarrage des opérations de transport.
- Utiliser des cycles plus longs lors des trajets où il y a des files d'attente à la pelle.

11.5 Réduction du temps de déplacement :

- Corriger les zones des rampes ou la pente ne sont pas constantes et lisses pour :
 - ✓ Maintenir une vitesse moyenne plus élevée
 - ✓ Permettre un effort de freinage plus constant lors des retours
 - ✓ Réduire les déversements
 - ✓ Réduire la consommation de carburant
- Classer mensuellement les rampes et les pistes en fonction du tonnage des matériaux qui seront transportés par ces voies d'accès, en accordant une importance particulière à maintenir les accès les plus importants en bon état.
- Réparez les camions dont les vitesses moyennes sont inférieures à celles des autres camions, tel que déterminé dans notre analyse précédente.
- Créez un rapport qui indique les vitesses des camions sur les différentes rampes et pistes, en accordant une importance particulière à la correction et à l'entretien des voies où la vitesse des camions est inférieure aux objectifs fixés par l'entreprise.

11.6 Maximisation de l'utilisation :

- En cas de disponibilité réduite des pelles, planifiez des cycles plus longs. En revanche, si la disponibilité est élevée, privilégiez des cycles plus courts.
- Introduisez une prime spéciale appelée "prime de vendredi" pour les opérateurs qui travaillent le vendredi après-midi. Organisez les équipes de manière à alterner leur participation à cette prime.
- Demandez aux opérateurs de rester dans les camions pendant les moments de prière en les plaçant dans un emplacement approprié.
- Pendant le ravitaillement, les opérateurs doivent rester à l'intérieur du camion.

11.7 Recommandation générale sur la disponibilité

Au cours de notre stage, nous avons observé que des anomalies dans les activités minières qui agissent sur la disponibilité et la durabilité des camions. Ceci affecte leur utilisation et leur productivité. Par exemple, la surcharge des camions entraîne des pannes au niveau de la transmission, de la suspension, de l'usure des pneus et une diminution de la performance de moteurs des camions. De plus, la mauvaise qualité des pistes et des rampes peut entraîner des pannes imprévues pour ces camions. Les activités effectuées pendant leur utilisation sont des indicateurs importants pour identifier les pannes auxquelles ils ont été soumis.

Par conséquent, les données des cycles de temps des camions, telles que la distance parcourue, le temps d'utilisation, les alarmes envoyées par les camions via le système VIMS (Vital Information Management System), la consommation de carburant, etc., sont essentielles pour prédire les pannes possibles et leur durée. La prédiction de ces informations peut nous aider à planifier un programme de maintenance préventive pour chaque camion, réduisant ainsi les pannes imprévues et augmentant la disponibilité des camions.

On propose d'utiliser les données enregistrées par les camions, associées à leurs cycles de temps, à leurs performances et à leur utilisation, afin de prédire les pannes potentielles et d'établir un plan de maintenance préventive pour les différents camions, dans le but d'augmenter leur disponibilité. Nous suggérons d'utiliser un programme d'intelligence artificielle basé sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour effectuer cette prédiction.

12 Conclusion

Pour en conclusion de cette étude est de mettre en évidence les différents facteurs responsables de la baisse de la performance des moyens de transport, dans le but de proposer des mesures d'amélioration de ces opérations.

L'analyse des cycles de rotations de ces moyens de transport du minerais, nous avons pu déterminer les différents facteurs qui impactent la charge utile des camions et quantifier les pertes causées par ces facteurs. De plus, nous avons étudié en détail toutes les composantes des cycles de temps des camions, en identifiant les différents paramètres responsables de leur augmentation et en quantifiant les pertes de temps causés par ces paramètres. Nous avons également identifié les principaux paramètres (Standby et operating delays) qui réduisent l'utilisation des camions, en identifiant les causes profondes de l'augmentation de ces paramètres.

Nous avons proposé des recommandations basées sur les résultats des analyses effectuées et les observations réalisées sur le terrain, afin d'améliorer les performances de la flotte de camions utilisée pour l'opération de transport.

13 Bibliographie

1. BRONNER G. (1992). Structure et DIDI Ould MOCTAR. (2009). Pérometallographie de la ceinture de roches vertes archéenne d'Aouéouat (Tasiast, nord de la Mauritanie). Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.
2. Caterpillar® Performance Handbook, Peoria et Illinois, April 2006.
3. Kinross OEE (Overall Equipment Efficiency) guidance for open pit mobile equipment
4. « Géologie générale de la Mauritanie ». L'office mauritanien de la recherche géologique. (2005). (www.omrg.mr)
5. ABDIVALL T. (1994). Caractérisation pétrographique et géochimique du plutonisme birimien de la dorsale Réguibat (Mauritanie, Afrique de l'ouest). Thèse Université Nancy1, (France), 172 p.
6. BOUCHOT V., LE GOFF E., Marcoux E. (1997). Etude pétrographique et métallographique, synthèse gîtologique des minéralisations aurifères du sillon d'Aouéouat (Tasiast, Mauritanie) : branche ouest, zone filonienne centrale et branche est du prospect C6-9 zone filonienne est du prospect C6-7, recoupées par sondage. Rap BRGM n° 97/033.
7. Évolution d'un craton archéen, la dorsale Réguibat occidentale (Mauritanie) : tectonique et métallogénie des formations ferrifères. Document du B.R.G.M(1975) n° 201. 448 p.
8. MAROT A., STEIN G., ARTIGNAN D., MILESI J.-P. (2003). Notice explicative des cartes géologiques et gîtologiques à 1/200 000 et 1/500 000 du Nord de la Mauritanie. Volume 2 – Potentiel Minier. DMG, Ministère des Mines et de l'Industrie, Nouakchott.

9. MAURIN G., BRONNER G., LE GOFF E., CHADRON D. (1997) – Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000 de la feuille Chami (Mauritanie) – Prospection aurifère dans le Tasiast-Tijirit. Rap BRGM N 2459, 32P.
10. ROCCI G. (1990). “Le socle ancien de Mauritanie un élément de croûte continental stable du craton ouest-africain“ in : CARUBA R., DARS R. (1991), Géologie de La Mauritanie. Université de Nice – Sophia Antipolis. p.24-37.
11. EL HADJ H. (2002). Les minéralisations aurifères dans les formations ferrifères d’Aouéouat, Tasiast, Mauritanie. Mémoire de Maîtrise, 229 p. Université du Québec à Montréal (UCAM).
12. MAROT A., BOSCH R., BERTAND B. (1997) –Permis Tasiast- Mauritanie. Etude d’indices et prospection d’anomalies aurifères. Avancement des travaux. Avancement des travaux. Rap. BRGM N2534/Lasource 10.059, 48 p., 8 fig., 8 tabl., 11 pl., 15 ann.
13. POTREL A. (1994). Evolution tectono-métamorphique d’un segment de croûte continentale archéenne. Exemple de l’Amsaga (R.I. Mauritanie), Dorsale Réguibat (Craton Ouest Africain). Mémoire de Géosciences Rennes.
14. Bouchot V., & Le Goff E. (1997). Etude gîtologique des prospectes CH6-7 et CH6-9 situés dans la région du Tasiast (Mauritanie). Rap. BRGM N 2534/La source 10.59.
15. MPEMI : Ministère du Pétrole, de l’Energie et des Mines
www.MPEMI.mr

Annexe A

Données utilisées

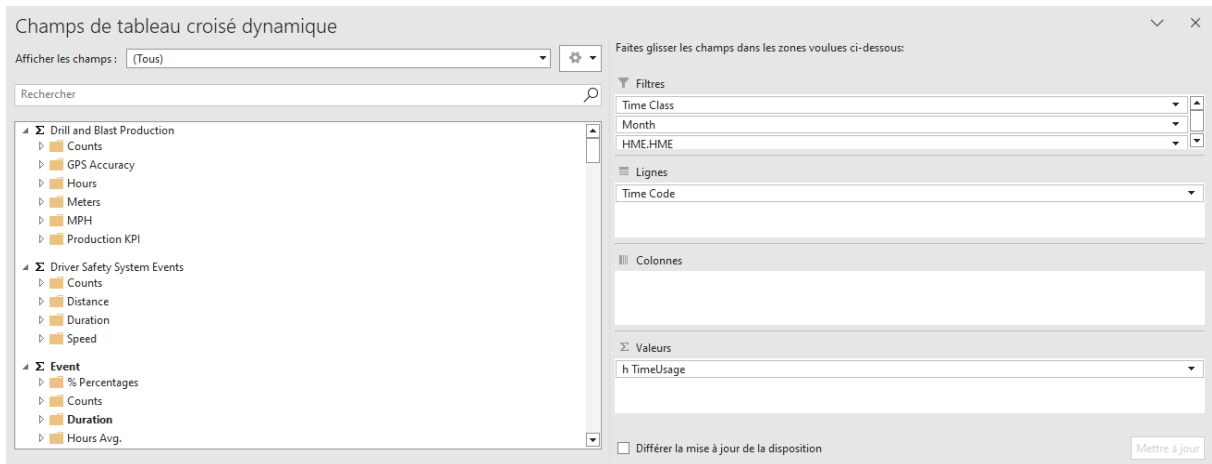
Les analyses ont été effectuées en utilisant des données provenant de plus de 125 166 cycles de transport réalisés par des camions sur une période de 5 mois, à partir du début de l'année 2023. Chaque cycle est enregistré dans une ligne Excel avec les informations suivantes :

- Date : La date de l'événement.
- Shift : Indique s'il s'agit d'une période de jour ou de nuit.
- Nom du camion : Le nom du camion qui a effectué le cycle.
- Conducteur du camion : Le nom de l'opérateur du camion.
- Nom de l'unité de chargement : Le nom de la pelle qui a chargé le camion.
- Conducteur de l'unité de chargement : Le nom de l'opérateur de la pelle.
- Charge utile : La charge transportée par le camion pendant le cycle.
- Temps d'attente du camion : La durée d'attente du camion.
- Temps de positionnement du camion : Le temps passé par le camion sous la pelle et à la verse.
- Temps de chargement du camion : La durée de chargement du camion.
- Temps de cycle total : Le temps total du cycle complet effectué par le camion.
- Distance : La distance parcourue par le camion pendant le cycle.
- Heure de début du cycle.
- Heure de fin du cycle

L'image suivante est une capture d'écran de données utilisées pour effectuer les différentes analyses :

HaulTruckSite#	HaulTruckOperator	LoadUnitSite#	LoadUnitOper#	SourceTim	Destination1	PayloadMash	PayloadTa	TotalCycleTms	QueueTime	LoadTime	DumpTime	SpotTime	TotalDistance
DT41	Ehacen Mohamed Cheikh (519337)	LO08	UNKNOW\LO08 (0)	06:46:03	08:40:51	205.2	220	6888	6188	465	52	24	1404
DT45	Boye Yaya (514342)	FS14	Diack Idr Mamadou	20:45:13	22:31:50	234.5	235	6337	5538	176	137	0	1702
DT80	Doumane Gaye Rawane (52324)	FS12	Mokhtar Mohamedo	08:48:42	10:08:22	205	220	4780	4302	159	35	82	1653
DT70	Saleh Mohamed Med (44821)	FS20	Diack Idr Mamadou	09:17:10	10:53:17	253.7	220	6067	3888	166	194	62	9435
DT53	Meinat Moulays Ely (722832)	EX11	Sow Abdoulays (19)	00:04:00	01:19:37	173.2	220	4537	3705	295	347	33	899
DT79	Ba Meimouna Samba (532444)	LO08	UNKNOW\LO08 (0)	08:28:02	09:46:50	92	220	4728	3621	392	561	31	537
DT58	Ely Mohamed Mâ™ bareck (638134)	EX11	Sow Abdoulays (19)	12:05:58	13:16:48	223.3	220	4250	3543	181	334	25	1375
DT83	Dippo Cheikh Moussa (515791)	EX11	Sow Abdoulays (19)	11:58:27	13:09:47	258.3	235	4280	3419	230	417	94	1408
DT47	Hassena Cheikh (520216)	EX11	Diagne Moussa (19)	03:05:49	04:11:34	253.2	220	3325	3356	296	43	28	1447
DT62	Diallo Hamed Med (225252)	FS14	Diack Idr Mamadou	22:49:02	00:21:10	210.7	220	5528	3334	148	107	0	9904
DT43	Hadi Mohamed El (513727)	EX11	Mokhtar Rajel El (19)	06:09:35	07:11:40	273.2	235	3725	3135	216	164	36	917
DT86	Bouchab Lehssen (326979)	FS20	Abdellahi Oumar O.	03:25:00	04:48:47	216.5	220	5027	3133	142	49	21	9631
DT42	Barro Souleyman (697951)	FS20	Abdellahi Oumar O.	02:57:56	04:23:11	163.8	220	5115	3108	163	82	33	9652
DT85	MHamede Sidi Med (698213)	LO07	UNKNOW\LO07 (0)	21:59:40	22:59:40	211.5	235	3900	3040	327	57	33	1330
DT58	NAmne Sidre Mohamed (692898)	FS20	Salek Moussa Ramz	23:39:51	01:12:36	288.3	220	5565	2958	253	55	25	9248
DT86	Dedy Sidi Ahmed Ahmed (667855)	FS14	Diack Idr Mamadou	23:09:51	00:32:52	207.1	220	4981	2945	143	48	16	9885
DT40	Boullat MBareck (561202)	FS14	Diack Idr Mamadou	23:06:32	00:31:02	169.7	220	5070	2944	141	47	12	9841
DT59	Moulays Mohamed Lemine (69735)	FS20	Diack Idr Mamadou	09:12:15	10:41:35	266.3	235	5360	2323	171	176	42	9452
DT86	Ba Meimouna Samba (532444)	FS16	Saghir Mohamed (5)	08:51:42	10:10:20	163.4	235	4778	2732	194	104	0	10710
DT86	Diagana Mohamed Alpha (225240)	EX11	Saidou Ba Abdoulay	22:42:13	23:35:13	238.4	220	3180	2639	230	65	36	904
DT80	Baghi Med Abdel (680777)	FS20	Samba Diallo Mama	09:28:53	10:45:04	198.6	220	4571	2653	173	62	19	10115
DT75	Memoune Ely Cheikh (511379)	LO07	UNKNOW\LO07 (0)	03:28:23	04:30:19	170.6	235	3776	2613	399	335	29	1687
DT78	Yezal Dummar Bilal (513335)	FS20	Niang Mamadou De	08:50:21	10:06:48	194.5	220	4587	2594	161	74	20	10311
DT82	Sedy Ahmed (520209)	EX11	Diagne Moussa (19)	02:56:17	03:48:31	234.2	220	3134	2495	329	84	36	1446
DT43	Elkhayat Chebahi Dum (520212)	LO08	UNKNOW\LO08 (0)	22:40:37	23:38:52	208	235	3495	2477	750	118	36	1453
DT79	Souelim Ahmed Taleb (692066)	FS20	Diagne Moussa (19)	08:54:11	10:28:32	225.6	220	5661	2385	123	69	37	11421
DT62	Denyich Saleh Mohamed (51718)	FS20	Samba Diallo Mama	09:25:41	10:39:59	211	220	4458	2374	134	63	18	10095
DT49	Halley Mohamed Abderahmane C (FS20)	FS20	Diagne Moussa (19)	09:19:59	10:32:46	221.9	220	4367	2361	129	67	103	10332
DT80	Baba Mohamed Salem Sidi (51123)	EX11	Sow Amadou (1922)	15:36:45	16:28:35	240.1	220	2980	2395	284	137	23	1392
DT66	Elkhayat Ghourou Ahmed Dum (E LO08)	UNKNOW\LO08 (0)	2155.29	22:47:23	155.3	220	3114	2333	418	149	36	1396	
DT83	Baba Mohamed Salem Sidi (51123)	EX11	Sow Amadou (1922)	01:33:16	02:33:08	68.7	235	3592	2287	420	383	33	1315
DT60	Sidi Cheikh Hamed (460367)	LO08	UNKNOW\LO08 (0)	15:09:03	16:20:12	223.3	220	4269	2286	486	1253	35	1413

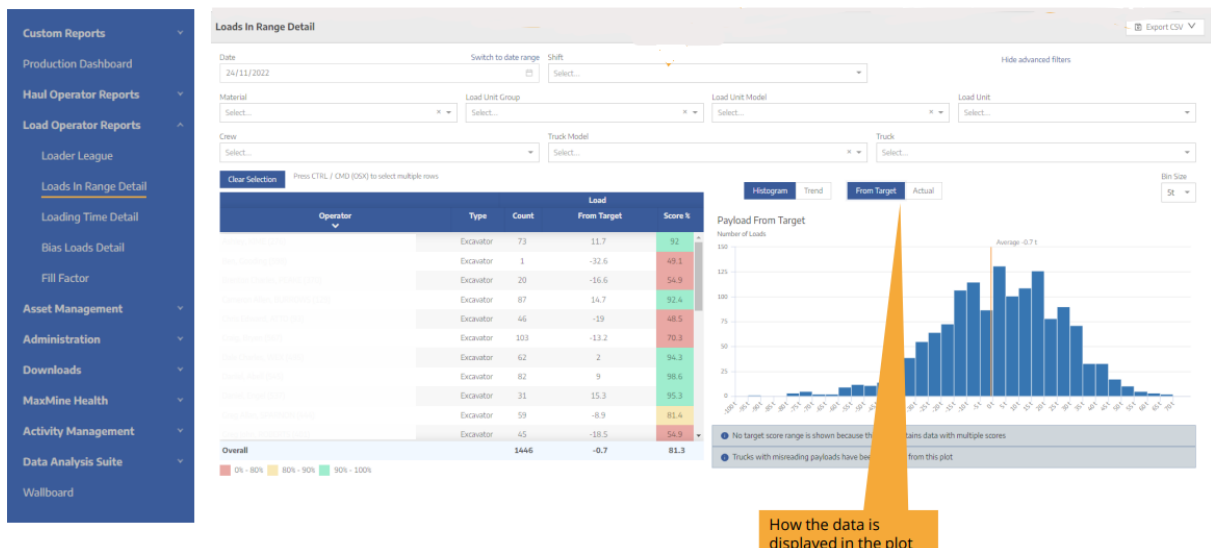
Nous avons également utilisé une base de données appelée "Cube" développée par notre entreprise. Cette base de données est sous forme d'une table pivotante dans Excel et contient toutes les informations liées aux différentes activités minières telles que le forage, le dynamitage, le chargement et le transport. La capture d'écran ci-dessous illustre l'apparence de Cube.



Nous avons également utilisé les données des camions enregistrées par une entreprise consultante à la mine de Tasiast, qui est MaxMine. MaxMine est une entreprise spécialisée dans la capture et l'analyse de données minières, ainsi que dans l'intégration de rapports et de conseils d'amélioration des affaires afin d'optimiser la productivité, de réduire les coûts, d'améliorer la sécurité et la gestion des actifs, et de réduire les émissions de carbone.

MaxMine propose une gamme de données relatives à l'utilisation, à la charge utile et aux temps de cycle des camions. Ces données sont disponibles sous forme de tableaux de bord et de rapports quotidiens accessibles sur le site de l'entreprise MaxMine.

L'image ci-dessous montre le site de MaxMine avec les différents tableaux de bord disponibles.



Pour effectuer les calculs économiques, nous avons utilisé les données économiques fournies par l'entreprise. Ces données comprennent les coûts opérationnels engagés par la flotte de camions Caterpillar793D pour l'année 2023, le coût en dollars par tonne de matériau transporté, le coût en dollars par heure d'utilisation des camions, ainsi que les coûts fixes et variables liés à l'exploitation. Ces informations nous ont permis de réaliser des analyses économiques approfondies et d'évaluer l'efficacité et la rentabilité des opérations minières.

La capture d'écran ci-dessous présente les données économiques fournies par l'entreprise Kinross Tasiast.

MINING EQUIPMENT OPERATING COST 2022 *							2023-Jan		to		2023-Dec	
Equipment	Operating hours			Operating Cost**			Operating Unit Cost					
Equipment Description	Unit Name	Operating time	Maintenance Time	Mining Cost (Adjusted)	Maintenance Cost (Adjusted)	Total Cost	Actual Cost per hour (\$/hr)	Budget Cost per hour (\$/hr)	Actual Cost per tonne (\$/t)	Budget Cost per tonne (\$/t)	Actual Cost per meter (\$/m)	Budget Cost per meter (\$/m)
Dump truck	793D	102,730	51,384	16,412,961	14,208,826	30,621,787	298.08	871.14	1.03	3.02		
	KOM 785	161	950	169,588	176,042	345,610	2,147.69	6,341.43	214.00	631.87		
Shovels	6060FS	11,918	5,410	4,271,560	7,662,143	11,933,703	1,001.35	2,288.18	0.48	1.09		
Excavator	RH340	4,640	974	1,274,883	1,334,174	2,609,057	562.24	1,426.81	0.71	1.81		
	PC1250	3,423	4,598	251,541	1,140,325	1,391,866	406.63	1,549.04	#N/A	#DIV/0!		
Drill Rig	SKFX	1,751	504	326,901	1,195,782	1,522,683	869.66	1,849.66			43.14	91.76
	DR580	5,753	3,181	1,143,585	1,509,437	2,653,022	461.19	1,712.38			23.75	88.20
	Pan1500	5,466	4,916	#N/A	-	#N/A	#N/A	#REF!			#N/A	#REF!
	MD6250	11,932	3,550	2,950,110	769,742	3,719,853	311.75	1,024.07			10.40	34.16
Loader	994H	1,542	4,126	284,000	1,708,020	1,992,020	1,292.11	3,054.63	1.95	4.61		
	D10	20,818	9,795	1,034,616	2,722,509	3,757,124	180.48	402.36				
Dozers	D11	2,470	4,388	122,754	319,004	441,758	178.85	803.63				
	CAT854	2,470	4,388	122,754	813,526	936,280	379.07	699.27				
Graders	16M	5,466	4,916	271,634	376,133	647,767	118.52	416.46				
	24M	2,313	2,900	114,930	390,440	505,370	218.54	1,123.58				
Water trucks	785W	5,305	6,563	263,650	425,783	689,433	129.96					

Annexe B

Les indicateurs de performance fournissent des mesures clés pour évaluer et surveiller les performances opérationnelles, identifiant les forces et les faiblesses de la flotte, et permettant de prendre des décisions éclairées pour optimiser les résultats. Ils peuvent inclure essentiellement des indicateurs tels que l'utilisation, la productivité et la disponibilité.

L'utilisation :

L'indicateur d'utilisation mesure le temps pendant lequel les camions sont effectivement en fonctionnement par rapport au temps total disponible, reflétant ainsi l'efficacité d'utilisation de la flotte. Elle dépend principalement des retards opérationnels « Delay » et des « Standby ».

$$\text{Utilisation} = \frac{\text{Temps total} - \text{Temps de pannes} - \text{Standby} - \text{Delay}}{\text{Temps total} - \text{Temps de panne}}$$

La productivité :

La productivité évalue la quantité de matériau déplacé dans une unité de temps donnée, ce qui permet de mesurer l'efficacité de la flotte à transporter les matériaux. Elle dépend principalement de la charge utile et du temps de cycle d'un camion.

$$\text{Productivité}(t/h) = \frac{\text{Charge utile}}{\text{Temps de cycle}}$$

❖ Charge utile : la charge utile fait référence au tonnage maximale de matériaux qu'un camion peut transporter, en plus de son propre poids, depuis la zone de chargement jusqu'à la zone de déchargement. Elle représente la capacité de charge disponible du camion, excluant le poids du lui-même. Elle peut être influencé par plusieurs facteurs tel que la fragmentation, la densité, la lithologie et les performances des opérateurs de la pelle.

❖ Temps de cycle : Le temps de cycle désigne le laps de temps nécessaire à un camion pour effectuer une série d'étapes, telles que le chargement, le transport, le déchargement et le retour à la zone de chargement.

$$\text{Temps de cycle} = TA + TP + TC + TT + TD + TR$$

TA : Temps d'attente à la pelle

TP : Temps de positionnement sous la pelle

TC : Temps de chargement

TT : Temps de transport plein

TD : Temps de déchargement

TR : Temps de retour à vide

La disponibilité :

La disponibilité reflète le pourcentage de temps pendant lequel les camions sont opérationnels, tenant compte des temps d'arrêt planifiés et imprévus pour la maintenance.

Le model du temps utilisé a Taisast :

Il s'agit d'un calendrier qui indique la répartition du temps d'un équipement en fonction de sa disponibilité, de ses temps d'arrêt et de son temps d'utilisation. Ce calendrier constitue la base pour le calcul de toutes les mesures liées à la performance.

Voici le model temporel utilisée à Kinross Tasiast :

Calendar time			
Available Time			Down
Operating Time		Standby	Unscheduled (incl. Operator Damage)
Utilized Time	Operating Delay		Scheduled (incl. PM)
Production Time (‘Ready’ in Dispatch)			

Le temps total

La production dans la mine se fait par poste de travail (shift) de mi-journée (12 heures) donc le temps total est de 12 pour chaque machine eue inclut les pelles et les camions qui sont les engins principaux de production.

Temps disponible

Parmi les 12h, le temps disponible se définit comme étant le temps dans lequel la machine est disponible mécaniquement et près à être utilisé, il est obtenu en enlevant du temps total les temps de maintenance planifiée et non planifiée. Sur la base du temps disponible on peut définir la disponibilité :

La Disponibilité : le pourcentage du temps disponible par le temps total

$$D = \frac{\text{Temps Total} - \text{Temps de pannes}}{\text{Temps Total}} = \frac{\text{Temps Disponible}}{\text{Temps Total}}$$

Donc le temps utilisé à son tour peut être déterminé à l’aide de la Disponibilité par la formule $\text{Temps Disponible} = \text{Temps Total} * \text{Disponibilité}$

Le temps de fonctionnement

Le temps de fonctionnement représente la fraction du temps disponible où l’engin est en mode opératoire, il est obtenu en soustrayant du temps disponible les (Stand-By). Ceux-ci représentent la fraction du temps disponible où l’engin est mécaniquement capable de remplir la fonction requise mais il n’est pas utilisé pour des raisons contrôlables (l’équipement n’est pas nécessaire) ou incontrôlables (absence d’opérateur, absence de camions pour les pelles, conditions climatique extrêmes...). Les différents Standby sont représentés dans le tableau suivant :

Sub code Standby	Description	Target
No Loading Units	Pas de pelle disponible	
Ramadan	Code utilise pendant le mois du ramadan durant l'arrêt du jeune	
Friday Pray	La prière du vendredi	4 heures
Weather	Conditions météorologiques	
Shiftchange	Changement de poste	
Return From Maintenance	machine qui retourne de l'équipe de maintenance	
Emergency	L'urgence	
No operator	Pas d'opérateur	
Holiday	Les fêtes	
Opportune Maintenance	Opportunité de maintenance.	
Equipement Not Needed	machine prêt mais on n'a pas besoin d'elle	
Strike	Greve	

Le temps Utilisé

C'est la fraction du temps disponible où l'équipement est utilisé uniquement dans la production. Il est obtenu en enlevant du temps disponible les (Stand-By) et toute les Retards opérationnels (Delay)

Retards opérationnels (Delay)

Les retards opérationnels représentent les retards dans un virage de nature contrôlable, ces retards peuvent être planifiés (dynamitage, déménagement ...) ou non planifiés (pause personnelle, relevé d'attente, attente d'approvisionnement ...). Les Principaux Retards opérationnels sont représentés dans le tableau suivant :

Sub code Delay	Description	Target en min
Prayer	Pause pour la prière	15
Blasting	Arrêt pour le tir	60
Fueling	Pause pour mettre le carburant	15
Meal	Pause pour prendre le repas	40
Change operator	Changement d'opérateur	7
Wait Crusher	Camion qui attend le concasseur	10
Personal break	Besoin personnel de l'opérateur	10
Operator inspection	Une inspection périodique des équipements faite par les opérateurs	8
Late Start	Commencement en retard	15
Road obstruction	Blocage des routes	20
Meeting	Réunion	13
Inspect work area	Inspection de l'espace de travail	10
Meet with supervisor	Réunion avec le superviseur	8
Incident investigation	Enquête d'incident	25
Cool tires	La température de pneus dépasse la température admise	9
Lube	Ajouter d'huile ou l'eau	10

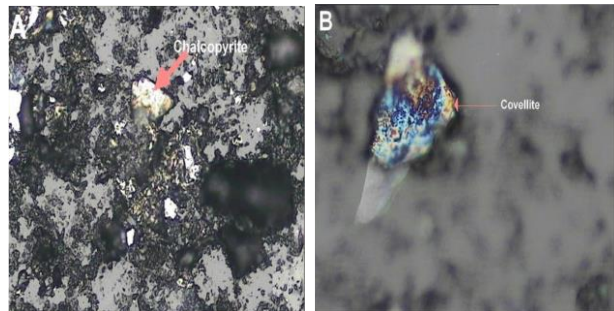
Utilisation

Après l'obtention du temps utilisé l'utilisation peut se définir comme étant le pourcentage de ce dernier par rapport au temps disponible.

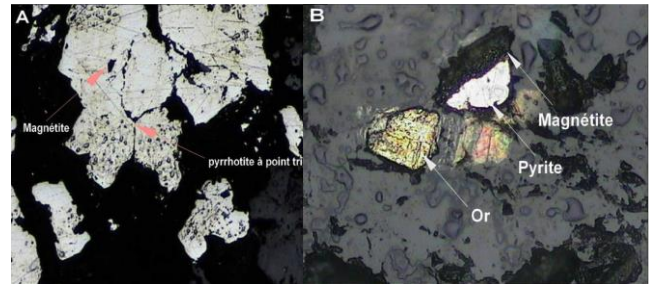
$$\text{Utilisation} = \frac{\text{Temps total} - \text{Temps de pannes} - \text{Standby} - \text{Delay}}{\text{Temps total} - \text{Temps de panne}}$$

Annexe C : étude métallographique¹

Les BIF

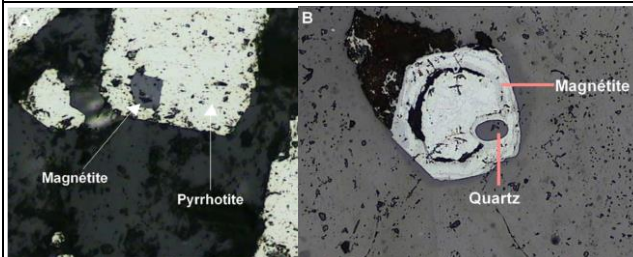


Photos en lumière réfléchie montrant en : (A) une chalcopyrite (G x 20) dans une zone d'altération à magnétite; (B) une chalcopyrite (G x 50) partiellement transformée en covellite.

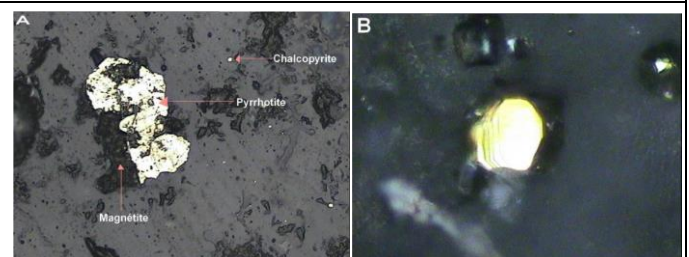


Photos en lumière réfléchie montrant en : (A) des cristaux de pyrrhotite subautomorphes (G x 5) à points triples, dans lesquels sont inclus des cristaux de magnétite ; (B) des grains d'or (G x 50) et un cristal de pyrite inclus dans les lits riches en magnétite.

Les métafelsites



Photos en lumière réfléchie montrant en : (A) des cristaux automorphes de pyrrhotite contenant de la magnétite (G x 20) ; (B) cristal automorphe zoné de magnétite transformé en hématite et renferme un cristal de quartz automorphe (G x 10).



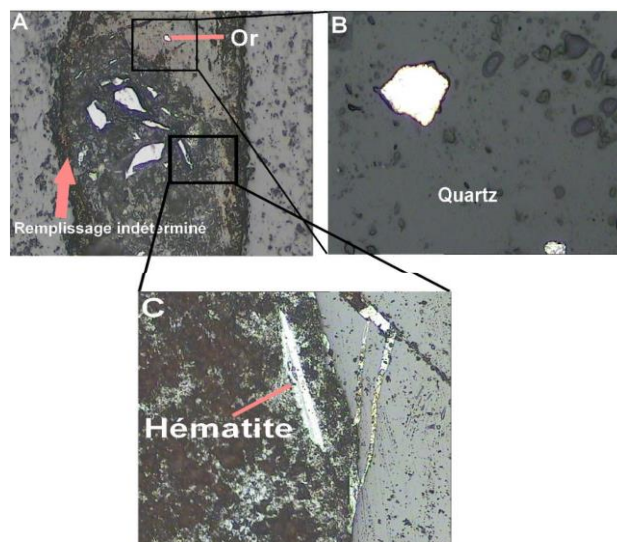
Photos en lumière réfléchie montrant en : (A) un cristal subautomorphe de pyrrhotite et des cristaux de chalcopyrite disséminés dans la matrice (G x 20) ; (B) cristal de chalcopyrite totalement transformé en covellite lamellaire (G x 10).



Photos en lumière réfléchie montrant en : (A) un cristal d'arsénopyrite (G x 20) en inclusion dans une magnétite xénomorphe ; (B) un cristal d'arsénopyrite (G x 20) en inclusion avec la magnétite dans un cristal de pyrrhotite ; (C) un grain d'or avec ses stries caractéristiques inclus dans la magnétite (G x 20).

1 : En plus de la vingtaine de lames minces confectionnées pour l'étude pétrographique, une vingtaine de lames polies et sections polies a été confectionnée au laboratoire de litholamellage de la Faculté des Sciences Dhar ElMahraz. Ces lames sont représentatives des principaux faciès minéralisés de la ceinture d'Aouéouat à l'exception des alternances (problème technique de durcissant). Ces faciès sont : les BIF, les métafélsites et les filons de quartz.

Les filons de quartz



photos en lumière réfléchie montrant en : (A) des grands cristaux de quartz (première génération) avec une inclusion d'or de la première génération et le remplissage de microfissures par la seconde génération de quartz et de minéraux opaques indéterminés ; (B) grains d'or de la première génération (Gx50) ; (C) cristal d'hématite associées avec les cristaux de quartz de la deuxième génération.

