



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



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Exploitation des mines

Analyse et amélioration de la performance du couple Pelle Camion au niveau de la mine de fer de Boukhadra (Nord-Est Algérie)

Par

1- Azzaz Ihab

2- Bendjedah Youcef.

Devant le jury :

Mme.Bouterfif Leila	Président	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Mme.Merah Chafia	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Mr.Saadaoui Salah	Examineur	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026



27/ 06/2026 تبسة في

رفع التحفظات

اسم ولقب الأستاذ المناقش: سعداوي صالح

Analyse et amélioration de la performance du couple Pelle Camion au niveau de la mine de fer de Boukhadra (Nord-Est Algérie)

الطلبة

1- عزاز ايهاب

2- بن جدة يوس ف

التخصص – استغلال المناجم - القسم – الجيوتكنولوجيا والمناجم

***موافق على وضع المذكرة في المكتبة بعد اجراء التصحيح المطلوب

امضاء الاستاذ المناقش

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) عزيزا بيهاب الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية 100030364041510001 و الصادرة بتاريخ 31.01.2022

المسجل بمعهد البحر قسم هندسة منجمية

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Analyse et amélioration de la performance du
couple pelle - Camion au niveau de la mine de Fer de
Boukhadja (Nord-Est Algérie)

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ 2026.06.04
المضاء المعنى (ة) أحمد

21

04 جوان 2026
عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
وبناءً على
مما أتيه
من الإدارة الإقليمية

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا المسمى أدناه،

السيد (ة) بن جعدة يوسف الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 100010364033550007، و الصادرة بتاريخ 14 - 09 - 2024
المسجل بمعهد الطناجيم قسم هندسة متجارية

و المكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :
مذكرة التخرج : Analyse et Amélioration de la performance du Couple pelle - Camion punitiveau de lumène de fer de
Bau khadra (Nord - Est Algérie)

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ : 2026/06/06

إمضاء المعنى (ة)



01/06/2026



عن رئيس المجلس
البلدي و متفوض
إمضاء صليلي زهير
صوت الإدارة الإقليمية



Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le : 04/06/2026

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1. Azzaz Iheb
2. Bendjedda Youcef
- 3.

Niveau : Master 2 Option : Exploitation des mines

Thème : Analyse et amélioration de la performance
du couple pelle camion au niveau de la
mine de Fer de Boukhadra (Nord-Est Algérie)

Nom et prénom de l'encadreur : MERAH Chafiq

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1: Présentation de la mine	
Chapitre 2: Etude du processus de chargement et transport	
Chapitre 3: Analyse opérationnelle et caractérisation longue pelle camion de la mine de B.E	
Chapitre 4: Sécurité et Environnement	



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد الشيخ لعربي التبسي- تبسة



مقرر رقم: 04 مؤرخ في: 04 جوان 2026
يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة الشهيد الشيخ لعربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 08- 09 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل الملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم
وبموجب المقرر رقم 03 المؤرخ في: 04 جوان 2026 يتضمن تعيين مناقشة مذكرة الماستر،

وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في : 04 جوان 2026
يقرر ما يأتي:

المادة 1: يُرخص للطلاب بن جدة يوسف

المولود بتاريخ 2001/09/21 ب. تبسة ولاية تبسة

بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة ب:

Analyse et amélioration de la performance du couple Pelle Camion au niveau de la mine de fer de
Boukhadra (Nord-est Algérie) »

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمنان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: حفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي.

04 جوان 2026

حُزِر ب تبسة، في: 04 جوان 2026

عن المدير ويتفويض منه





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم : 04 جوان 2026

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 09-08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- بموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تاهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.
و بموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل الملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تاهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم.
وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم رقم 03 المؤرخ في 24 ماي 2026.

يقرر ما يأتي:

المادة 1: تُعين بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضرة من طرف
الطالب: بن جدة يوسف المولود بتاريخ: 2001/09/21 بـ تبسة ولاية تبسة

والموسومة بـ:

Analyse et amélioration de la performance du couple Pelle Camion au niveau de la mine de fer de Boukhadra (Nord-est Algérie) »

والمسجل بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصفة
1	بوطرفيف ليلي	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	مراح شافية	أستاذ محاضر أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	سعداوي صالح	أستاذ محاضر ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	مناقشا

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كلّ من الطالب المعني والمشرّف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُزّر ب تبسة، في: 04 جوان 2026

عن المدير، وبتفويض منه
مدير المعهد



مقرر رقم : 04.0.4 مؤرخ في :
04 جوان 2026 يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة الشهيد
الشيخ العربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 09-08 المؤرخ في :
04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات
للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- بموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تاهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.
و بموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل الملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 و المتضمن تاهيل ماستر
الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة ، اختصاص استغلال المناجم.
وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم رقم 03 المؤرخ في 24 ماي 2026.

يقرر ما يأتي:

المادة 1: تُعَيَّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضرة من طرف

الطالِب : عزاز ايهاب المولود بتاريخ 2003/09/15 ب. تبسة ولاية تبسة

والموسومة بـ:

Analyse et amélioration de la performance du couple Pelle Camion au niveau de la mine de fer de Boukhadra (Nord-est
Algérie) »

والمسجل بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصفة
1	بوطرفيف ليلي	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	مراح شافية	أستاذ محاضر أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	سعداوي صالح	أستاذ محاضر ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	مناقشا

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كل من الطالِب المعني والمشرف
على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطلّاب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

04 جوان 2026

مؤرخ ب تبسة، في:
مدير المعهد
مدير المعهد
مدير المعهد

مقرر رقم: ٥٥٥٥ مؤرخ في: ٠٤ جوان ٢٠٢٦
يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم"
مديرا لجامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي -تبسة،
و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتمم المرسوم التنفيذي رقم
09- 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي بتبسة،
وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي
يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7
منه.

- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل الملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 اكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة اختصاص استغلال المناجم

وبموجب المقرر رقمالمؤرخ في.....**04 جوان 2026**.....والمتضمن تعيين مناقشة مذكرة الماستر، وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في: **04 جوان 2026**.....

يقرر ما يأتي:

المادة 1: يُرَخَّصُ للطلاب : عزاز ايهاب
المولود بتاريخ: 2003/09/15 ب. تبسة
بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة ب:

Analyse et amélioration de la performance du couple Pelle Camion au niveau de la mine de fer de Boukhadra (Nord-est Algérie) »

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: حفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطلاب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي.

حُرِّبَ تَبَسَةً، فِي: ١٦ جوان 2028

عن الشيخ العربي الذي استوفى منه
ملاقي العرب
لم يحضر ملاقي العباد
أبو العباس
في زواجر
عهد الشافعي

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'analyser, d'évaluer et d'améliorer les performances du système Pelle–Camion utilisé dans la mine de fer de Boukhadra. Cette recherche s'inscrit dans une démarche d'optimisation des opérations de chargement et de transport, qui constituent des étapes essentielles dans l'exploitation minière à ciel ouvert.

Après une présentation générale de la mine de Boukhadra, de son contexte géologique et des équipements utilisés, notamment la pelle hydraulique et la flotte de camions de transport, une campagne de chronométrage a été réalisée afin de mesurer les différentes composantes des cycles opérationnels. Les données recueillies ont permis d'effectuer une analyse détaillée des temps de chargement, de transport, de déchargement et des temps d'attente.

L'étude repose sur une approche statistique basée sur le calcul des moyennes, des variances et des écarts-types des différents paramètres observés. Ces indicateurs ont permis d'évaluer la stabilité des opérations, d'identifier les sources de variabilité et de quantifier les pertes de productivité au sein du système étudié.

Par ailleurs, les coefficients d'utilisation ainsi que les rendements réels de la pelle et des camions ont été déterminés afin d'apprécier l'efficacité opérationnelle des équipements. Pour consolider l'ensemble de ces indicateurs techniques en un diagnostic unique, la méthode OEE (Overall Equipment Effectiveness) ou Taux de Rendement Global (TRG) a été appliquée afin de segmenter finement les pertes d'efficacité et d'évaluer la performance globale du système de production.

L'étude a également intégré l'analyse du Match Factor, indicateur permettant d'évaluer le niveau d'adéquation entre la capacité de chargement de la pelle et la capacité de transport de la flotte de camions. Cette approche a permis d'identifier les déséquilibres du système et de proposer des scénarios d'optimisation visant à réduire les temps improductifs et à améliorer la productivité globale.

Les résultats obtenus montrent que le système Pelle–Camion présente des performances satisfaisantes, tout en mettant en évidence certaines pertes liées principalement aux temps d'attente des camions au chargement. L'analyse du Match Factor a confirmé l'existence d'un léger surdimensionnement de la flotte de transport par rapport à la capacité de la pelle. Des recommandations d'optimisation ont ainsi été proposées afin d'améliorer l'équilibre du système, de réduire les coûts d'exploitation et d'augmenter l'efficacité des opérations minières.

Mots-clés : Système Pelle–Camion, statistique, moyenne, variance, écart-type, coefficient d'utilisation, rendement, OEE, Taux de Rendement Global, Match Factor, mine de Boukhadra.

Abstract

The main objective of this study is to analyze, evaluate, and improve the performance of the Shovel–Truck system used in the Boukhadra iron ore mine. This research is part of an optimization approach for loading and hauling operations, which represent essential stages in open-pit mining activities.

After presenting the general overview of the Boukhadra mine, including its geological context and the equipment used—particularly the hydraulic shovel and the truck fleet—a time study campaign was conducted to measure the different components of operational cycles. The collected data enabled a detailed analysis of loading, hauling, dumping, and waiting times.

The study is based on a statistical approach involving the calculation of means, variances, and standard deviations of the observed parameters. These indicators allowed the assessment of operational stability, the identification of variability sources, and the quantification of productivity losses within the studied system.

Furthermore, equipment utilization coefficients and actual performance rates of both the shovel and trucks were determined in order to evaluate operational efficiency. To consolidate all technical indicators into a single diagnosis, the Overall Equipment Effectiveness (OEE) method was applied to break down inefficiencies and assess the global performance of the production system.

The study also included the analysis of the Match Factor, an indicator used to evaluate the compatibility between shovel loading capacity and truck hauling capacity. This approach made it possible to identify system imbalances and propose optimization scenarios aimed at reducing idle times and improving overall productivity.

The results show that the Shovel–Truck system demonstrates satisfactory performance while highlighting certain losses mainly related to truck waiting times at the loading point. The Match Factor analysis confirmed a slight oversizing of the truck fleet relative to shovel capacity. Optimization recommendations were therefore proposed to improve system balance, reduce operating costs, and enhance mining operational efficiency.

Keywords: Shovel–Truck system, statistics, mean, variance, standard deviation, utilization coefficient, efficiency, OEE, Overall Equipment Effectiveness, Match Factor, Boukhadra mine.

الملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحليل وتقييم وتحسين أداء نظام الحفارة-الشاحنات المستخدم في منجم الحديد ببوخضرة. تندرج هذه الدراسة ضمن منهجية تهدف إلى تحسين عمليات التحميل والنقل، والتي تُعد من المراحل الأساسية في استغلال المناجم السطحية.

بعد تقديم عرض عام لمنجم ببوخضرة من حيث السياق الجيولوجي والمعدات المستعملة، وخاصة الحفارة الهيدروليكية وأسطول الشاحنات، تم تنفيذ حملة قياس زمني لمختلف عناصر الدورة التشغيلية. وقد سمحت البيانات المجمعة بتحليل دقيق لأزمنة التحميل والنقل والتفريغ وأوقات الانتظار.

تعتمد الدراسة على مقارنة إحصائية تشمل حساب المتوسطات والتباينات والانحرافات المعيارية للمعطيات المرصودة، مما سمح بتقييم استقرار العمليات وتحديد مصادر التباين وقياس خسائر الإنتاجية داخل النظام المدروس.

كما تم حساب معاملات الاستغلال ومعدلات الأداء الفعلية لكل من الحفارة والشاحنات بهدف تقييم الكفاءة التشغيلية. ولتجميع مختلف المؤشرات التقنية في تشخيص واحد، تم اعتماد طريقة الفعالية الكلية للمعدات (OEE) أو معدل العائد الإجمالي (TRG) من أجل تفكيك مصادر الفاقد وتقييم الأداء العام لنظام الإنتاج.

كما شملت الدراسة تحليل معامل المطابقة (Match Factor)، وهو مؤشر يقيس مدى التوافق بين قدرة الحفارة على التحميل وقدرة الشاحنات على النقل. وقد سمح هذا التحليل بتحديد اختلالات النظام واقتراح سيناريوهات تحسين تهدف إلى تقليل أوقات التوقف ورفع الإنتاجية الإجمالية.

أظهرت النتائج أن نظام الحفارة-الشاحنات يتمتع بأداء مقبول، مع وجود بعض الفوائد المرتبطة أساساً بأوقات انتظار الشاحنات عند التحميل. كما أكد تحليل معامل المطابقة وجود زيادة طفيفة في عدد الشاحنات مقارنة بقدرة الحفارة. وبناءً على ذلك، تم تقديم توصيات لتحسين توازن النظام، وتقليل تكاليف التشغيل، ورفع كفاءة العمليات المنجمية.

الكلمات المفتاحية: نظام الحفارة-الشاحنات، الإحصاء، المتوسط، التباين، الانحراف المعياري، معامل الاستغلال، الكفاءة، OEE، الفعالية الكلية للمعدات، معامل المطابقة، منجم ببوخضرة.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus cher à mon cœur, ma très chère mère, pour son amour, ses sacrifices et son soutien inconditionnel.

À mon père, qui m'a guidé, soutenu et encouragé tout au long de mon parcours.

À mon cher frère et à mes chères sœurs, pour leur affection, leur présence et leurs encouragements constants.

À tous mes amis, pour leur amitié sincère et les moments partagés.

À tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et m'ont accompagné tout au long de mes années d'études.

*À ma promotrice, **Mme. Merah Chafia**, pour son encadrement, sa disponibilité, ses conseils précieux et la confiance qu'elle m'a accordée durant la réalisation de ce travail.*

Enfin, je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma réussite et à l'aboutissement de ce projet.

À tous, j'exprime ma profonde gratitude.

Remerciements

*Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma promotrice, **Mme.Merah Chafia**, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail.*

*J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury, **Mme.Bouterfif** Leila et **Mr.Saadaoui Salah**, pour l'honneur qu'elles me font en acceptant d'évaluer ce mémoire.*

Je tiens aussi à remercier tous les étudiants de Master 2 avec lesquels j'ai eu le plaisir de partager cette année universitaire, ainsi que toutes les personnes que j'ai eu l'occasion de rencontrer et avec lesquelles j'ai pu échanger durant mon parcours.

*Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble de mes enseignants pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement et les connaissances qu'ils m'ont transmises au cours de l'année universitaire **2025/2026**.*

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille pour son soutien indéfectible, ses encouragements et sa confiance tout au long de mes études.

À toutes et à tous, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>المخلص</i>	<i>iii</i>
<i>Dédicace</i>	<i>iv</i>
<i>Remerciements</i>	<i>v</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
1. Chapitre 1 – Présentation de la mine et du cadre de l'étude	3
1.1 Historique de la mine	4
1.1.1 Dates marquantes de l'évolution de l'exploitation minière	5
1.2 Localisation de la mine de Boukhadra	6
1.3 Contexte géologique et caractéristiques du gisement	8
1.3.1 Cadre géologique régional	8
1.3.2 Nature et qualité du minerai	9
1.3.3 Morphologie et structure du gisement	10
1.3.4 Réserves et potentiel minier	11
1.4 Méthode d'exploitation et organisation de la production	15
1.4.1 Méthode d'exploitation à ciel ouvert	15
1.4.2 Chaîne technologique de production	15
1.4.3 Organisation du travail et production	16
1.4.4 Exploitation souterraine	17
1.4.5 Contraintes spécifiques du site	24
1.4.4 Contraintes topographiques	24
1.4.5 Contraintes climatiques	25
1.4.6 Contraintes liées aux pistes de roulage	25
1.4.7 Contraintes techniques et organisationnelles	26
2. Chapitre 2 – Etude de processus chargement et transport	28
2.1 Chargement et transport dans les Mines ciel ouvert	29
2.1.1 Chargement	29
But du chargement	30
Engins utilisés	30
Paramètres techniques du chargement	30
Cycle de chargement	31
Classification des godets utilisés dans les engins de chargement	31
2.1.2 Transport	32
Les moyens de transport	33

But du transport	34
Paramètres techniques du transport	35
Cycle de transport	35
Rendement du transport	35
Classification des moyens de transport	36
2.2 Place du système Pelle–Camion dans la chaîne de valeur	37
2.3 Description des pelles utilisées	41
2.4 Description de la flotte de camions	43
2.5 Adéquation Pelle–Camion	46
3. Chapitre 3 : analyse opérationnelle et amélioration du couple pelle-camion de la mine de boukhadra	50
3.1 Introduction	51
3.2 Rappels Théoriques et Outils Statistiques	51
3.3 Cadre Méthodologique de la Méthode OEE (Overall Equipment Effectiveness)	53
3.5 Analyse du Cycle Opératoire de l'Excavatrice (Pelle KOMATSU PC.1250-7)	54
3.5.1 Relevés chronométriques de la pelle	54
3.5.2 Traitement statistique des temps de la pelle	55
3.5.3 Analyse critique et interprétation opérationnelle (Pelle)	56
3.5.4 Rendements et Taux d'Utilisation de l'excavateur	56
3.5.5 Évaluation de l'OEE de la Pelle	58
L'OEE est calculé à partir du produit de trois facteurs clés conformes à la norme NF E60-182 :	58
3.6 Étude du Cycle de Transport (Flotte de Camions)	58
3.6.1 Collecte des données et traitement statistique complet	59
3.6.2 Analyse critique et interprétation opérationnelle (Transport)	60
3.7 Coefficients d'Utilisation et Rendements de la Flotte de Camions	61
3.7.1 Décomposition du temps de cycle	61
3.7.2 Indicateurs d'efficacité et de rendement	61
3.8 Évaluation de l'OEE de la Flotte de Camions	62
3.9 Équilibrage du Couple Pelle-Camion et Dimensionnement de la Flotte	63
3.9.1 Calcul du Match Factor (MF)	63
3.9.2 Calcul du nombre de camions optimal (Nopt)	64
3.8.3 Conséquences et recommandations d'ingénierie pour Boukhadra	64
4. Chapitre 4 – Sécurité et environnement dans la mine de Boukhadra	65
4.1. Présentation générale de la mine de Boukhadra	66
4.2. Importance de la sécurité dans les mines à ciel ouvert	67
4.3. Les principaux risques dans la mine de Boukhadra	68
4.3.1. Risques liés aux travaux de forage	68

4.3.2. Risques liés aux explosifs et aux tirs	68
4.3.3. Risques liés au transport minier	69
4.4. Risques géotechniques	69
4.5. <i>Les équipements de protection individuelle</i>	70
<i>Conclusion Générale</i>	81
<i>Références bibliographiques</i>	84

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1: Dates clés de l'exploitation minière de Boukhadra et Ouenza</i>	5
<i>Tableau 1.2 : Composition chimique moyenne du minerai de Boukhadra</i>	10
<i>Tableau 1.3 : Classification des réserves minières.</i>	12
<i>Tableau 1.4 : Répartition des réserves de la mine de Boukhadra.</i>	14
<i>Tableau 1.5 : Principaux paramètres du plan de tir</i>	22
<i>Tableau 1.6 : Classification des explosifs selon la vitesse de détonation</i>	23
<i>Tableau 2.1 : Classification des engins de chargement.</i>	32
<i>Tableau 2.2 : Principaux engins de chargement et de transport utilisés en exploitation minière.</i>	33
<i>Tableau 2.3 : Classification des moyens de transport.</i>	36
<i>Tableau 2.4 : KPIs du système (données observées sur site Boukhadra)</i>	40
<i>Tableau 2.5 : Cycle de chargement Pelle (observations 10 cycles)</i>	43
<i>Tableau 2.6 : Cycle transport Camion (moyenne 20 cycles)</i>	45
<i>Tableau 2.7 : Influence de la fragmentation sur le rendement du système.</i>	46
<i>Tableau 2.8 : Simulation adéquation</i>	48
<i>Tableau 3.1: Relevés chronométriques des cycles de la pelle KOMATSU PC.1250-7 (en secondes).</i>	54
<i>Tableau 3.2 : Cycles chronométrés complets et indicateurs statistiques de la flotte de camions (en minutes).</i>	59

Liste des figures

<i>Figure 1.1 : Situation géographique de la mine de BOUKHADRA.</i>	7
<i>Figure 1.2 : Localisation géographique 3D de la mine de Boukhadra.</i>	7
<i>Figure 1.3 : Carte géologique régionale.</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 1.4 : schéma explicatif (anticlinal + failles)</i>	9
<i>Figure 1.5 : Structure de gisement de BOUKHADRA</i>	11
<i>Figure 1.6 : Schéma de chaîne de production</i>	17
<i>Figure 1.8 : Schéma des contraintes impactant le système Pelle–Camion</i>	27
<i>Figure 2.1 : Chaîne de production dans une mine à ciel ouvert.</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 2.2 : Principaux équipements de chargement et de transport utilisés dans le système Pelle–Camion.</i>	34
<i>Figure 2.3 : Classification des systèmes de transport minier.</i>	36
<i>Figure 2.4 : Schéma complet du cycle Pelle–Camion</i>	38
<i>Figure 2.5 : Pelle PC990LC en opération</i>	42
<i>Figure 2.6 : Flotte camions et pistes</i>	45
<i>Figure 2.7 : Courbe d'adéquation (Taux matching)</i>	49

Introduction générale

L'industrie minière constitue un secteur stratégique dans le développement économique des nations, en raison de son rôle fondamental dans la valorisation des ressources naturelles et l'alimentation des industries de transformation en matières premières. Parmi ces ressources, le minerai de fer occupe une place prépondérante, notamment dans l'industrie sidérurgique, ce qui confère à son exploitation un intérêt économique et industriel majeur.

Dans ce contexte, la mine de Boukhadra, située dans la wilaya de Tébessa, représente l'un des principaux gisements de fer en Algérie. Son exploitation contribue de manière significative à la couverture des besoins nationaux en minerai de fer et au développement du secteur sidérurgique. Toutefois, la rentabilité et la performance globale de cette activité reposent fortement sur l'optimisation des opérations de production, en particulier celles relatives au chargement et au transport, qui constituent des postes de coûts déterminants dans les mines à ciel ouvert.

Le système Pelle–Camion, largement adopté dans les exploitations minières à ciel ouvert, assure les opérations d'extraction, de chargement et d'acheminement du minerai. L'efficacité de ce système dépend d'un ensemble de paramètres techniques et organisationnels, notamment les temps de cycle, les capacités des équipements, la disponibilité mécanique, l'état des pistes de roulage ainsi que les conditions d'exploitation. Toute inadéquation entre les unités de chargement et de transport peut engendrer des pertes de productivité significatives, se traduisant par une augmentation des temps improductifs et des coûts d'exploitation.

Le présent travail a pour objectif d'analyser le processus de chargement et de transport au sein de la mine de Boukhadra, d'évaluer les performances actuelles du système Pelle–Camion et d'identifier les principaux facteurs limitant son efficacité opérationnelle. Cette étude vise également à proposer des axes d'amélioration permettant d'optimiser la productivité globale du système tout en respectant les contraintes de sécurité et d'environnement.

Afin d'atteindre ces objectifs, le travail est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation générale de la mine de Boukhadra, incluant son historique, sa localisation géographique, son contexte géologique ainsi que les méthodes d'exploitation adoptées.

Dans une démarche méthodologique, une campagne de mesures chronométriques a été réalisée afin de décomposer les cycles de fonctionnement de la pelle et des camions en différentes phases élémentaires, à savoir : l'attente, la manœuvre, le chargement, le roulage et le déchargement. Les données recueillies ont ensuite fait l'objet d'un traitement statistique descriptif reposant sur le calcul des moyennes, des variances et des écarts-types, permettant d'évaluer la variabilité des performances et de garantir la fiabilité des observations.

Par la suite, ces résultats ont permis de déterminer les coefficients d'utilisation des équipements ainsi que leurs rendements horaires et opérationnels. Afin de consolider l'ensemble des indicateurs de performance en un diagnostic global, la méthode de l'Overall Equipment Effectiveness (OEE) ou Taux de Rendement Global (TRG) a été appliquée, permettant de décomposer les pertes d'efficacité et d'identifier leurs origines principales.

Enfin, l'analyse a été complétée par l'évaluation du Match Factor, indicateur permettant d'apprécier le degré d'adéquation entre la capacité de chargement de la pelle et celle de la flotte de camions. Cette approche a mis en évidence des déséquilibres dans la configuration du système, ouvrant la voie à plusieurs scénarios d'optimisation visant l'amélioration de l'équilibrage opérationnel.

Les résultats obtenus montrent que le système Pelle–Camion présente globalement un niveau de performance acceptable. Toutefois, des pertes de productivité ont été identifiées, principalement liées aux temps d'attente des camions au niveau du point de chargement. L'analyse du Match Factor a également révélé un léger surdimensionnement de la flotte de transport par rapport à la capacité de la pelle. Ces constats ont permis de formuler des recommandations techniques et organisationnelles visant à améliorer l'équilibrage du système, réduire les temps improductifs et optimiser la performance globale de l'exploitation minière.

1. Chapitre 1 – Présentation de la mine et du cadre de l'étude

Introduction

Ce chapitre présente le cadre général de l'étude à travers la localisation de la mine de Boukhadra, son contexte géologique et ses caractéristiques principales. Il décrit également la méthode d'exploitation adoptée, ainsi que le rôle du système Pelle–Camion et les contraintes influençant son fonctionnement.

Dans le domaine minier, l'exploitation des gisements peut être réalisée selon deux approches principales : l'exploitation à ciel ouvert et l'exploitation souterraine. Le choix entre ces méthodes dépend de plusieurs facteurs, notamment la profondeur du gisement, sa géométrie, ainsi que les contraintes économiques et techniques. D'une manière générale, l'exploitation à ciel ouvert se caractérise par une productivité élevée et des coûts relativement faibles, tandis que l'exploitation souterraine est adoptée pour les gisements profonds malgré des coûts plus élevés et des conditions d'exploitation plus complexes.

Dans ce contexte, l'analyse de ces deux méthodes permet de mieux situer le choix technique adopté au niveau de la mine de Boukhadra et de comprendre les enjeux liés à l'organisation de la production.

1.1 Historique de la mine

L'exploitation de la mine de Boukhadra remonte à l'époque romaine, durant laquelle les premières activités extractives étaient principalement orientées vers l'extraction du cuivre, notamment au niveau de la zone du pic (Boukhadra). Par la suite, l'exploitation minière s'est progressivement diversifiée pour inclure le zinc ainsi que d'autres substances polymétalliques, dans le cadre de la concession de Boukhadra attribuée à M. Tadro (SONAREM, 1985).

Au cours de la période allant de 1903 à 1926, la concession de Mokta El Hadid a entrepris d'importants travaux de recherche systématique, notamment par le creusement de galeries minières couvrant des niveaux altimétriques compris entre 845 et 1225 mètres (Mokta El Hadid, 1926).

Entre 1926 et 1966, année marquant la nationalisation du secteur minier en Algérie, l'exploitation du gisement de Boukhadra était assurée par la société de l'Ouenza. Cette dernière a mené des travaux approfondis de reconnaissance, combinant des travaux miniers souterrains et des campagnes de sondages (Ouenza ; ANAM, 2000).

Durant la période de 1967 à 1984, la Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière (SONAREM) a été chargée de l'exploitation et du développement des travaux de recherche sur les gisements ferrifères de l'Ouenza et de Boukhadra (SONAREM, 1985).

À la suite de la restructuration des entreprises publiques intervenue entre 1983 et 1984, la gestion, l'exploitation ainsi que le développement des activités de recherche sur l'ensemble des gisements ferrifères du territoire national ont été confiés à l'entreprise FERPHOS (FERPHOS, 2005).

Enfin, en date du 18 octobre 2001, dans le cadre d'une politique d'ouverture et de partenariat avec des opérateurs étrangers, le holding LNMNV a conclu un accord de partenariat avec la société Hadid Ouenza-Boukhadra, filiale de FERPHOS, dans lequel il détenait une participation majoritaire de 70 % (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2002).

1.1.1 Dates marquantes de l'évolution de l'exploitation minière

Tableau 1.1: Dates clés de l'exploitation minière de Boukhadra et Ouenza

Période / Date	Événement
Époque romaine	Exploitation du cuivre (Cu) et du zinc (Zn)
1903 – 1906	Travaux de recherche par galeries réalisés par Mokta El Hadid
1913	Création de la société de l'Ouenza
1921	Mise en exploitation du gisement de l'Ouenza
1926	Début de l'exploitation du gisement de Boukhadra
1939	Électrification de la voie ferrée
1949	Intensification de la mécanisation lourde
1966	Nationalisation des mines en Algérie
1983	Restructuration de la SONAREM et création de FERPHOS
1985	Mise en service du 2 ^e haut fourneau et arrêt de certaines exploitations
1990	Passage de FERPHOS à l'autonomie de gestion
Octobre 2001	Partenariat avec le groupe Ispat (LNM)
Décembre 2004	Intégration au groupe Mittal Steel
Juin 2007	Intégration au groupe ArcelorMittal

08 août 2016	Création de la société Mines de Fer de l'Est (MFE)
2017 – 2019	Reprise progressive des activités par MFE après le départ d'ArcelorMittal
2020 – 2022	Mise en place de plans de relance et modernisation de la production (approvisionnement du complexe d'El Hadjar)
2023	Intensification des programmes de développement et optimisation de la production minière
2024	Lancement de projets de partenariat et mémorandums pour valorisation du minerai et investissements industriels
2025 (prévision)	Objectif d'augmentation de la production nationale de minerai de fer et intégration accrue dans la stratégie industrielle (sidérurgie et transformation locale)

1.2 Localisation de la mine de Boukhadra

La mine de fer de Boukhadra est localisée dans le Nord-Est de l'Algérie, au sein de la wilaya de Tébessa, à environ 45 km au Nord-Est de cette dernière et à proximité immédiate de la frontière tunisienne. Elle s'inscrit dans une région minière importante comprenant également le gisement de l'Ouenza, formant ainsi un bassin ferrière stratégique pour l'économie nationale.

Le site minier est implanté dans le massif montagneux du Djebel Boukhadra, appartenant à l'Atlas saharien oriental. Ce relief accidenté, caractérisé par des altitudes variant entre 750 m et 1463 m, impose des contraintes significatives sur les conditions d'exploitation, notamment en termes d'accessibilité, de circulation des engins et de stabilité des talus.

Sur le plan des infrastructures, la mine bénéficie d'un réseau logistique développé, incluant une voie ferrée assurant le transport du minerai vers le complexe sidérurgique d'El Hadjar à Annaba. Cette connexion constitue un élément clé dans la chaîne de valorisation du minerai.

Le climat de la région est de type continental semi-aride, marqué par de fortes amplitudes thermiques. Les étés sont très chauds, avec des températures pouvant atteindre 40°C, tandis que les hivers sont froids, avec des températures proches de 0°C. La faible pluviométrie et la présence de vents fréquents contribuent à la formation de poussières, ce qui peut affecter les conditions de travail et la performance des équipements.

Ainsi, la localisation géographique et les conditions naturelles du site jouent un rôle déterminant dans l'organisation et l'efficacité des opérations minières.

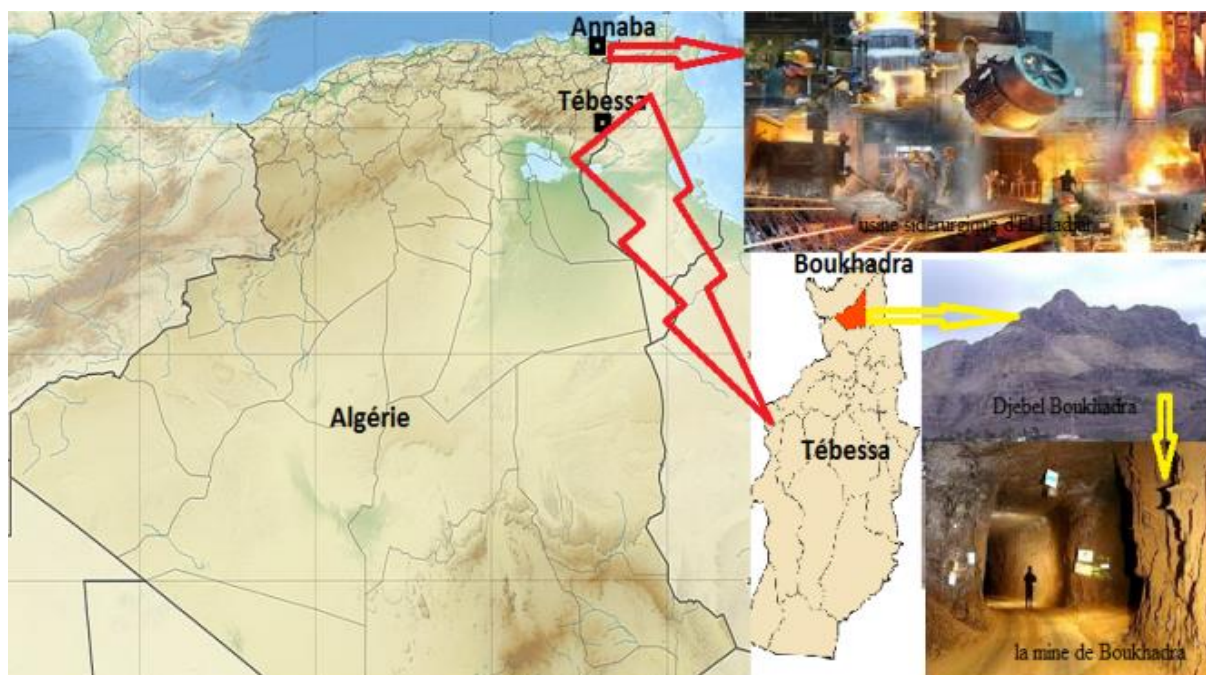


Figure 1.1 : Situation géographique de la mine de BOUKHADRA.

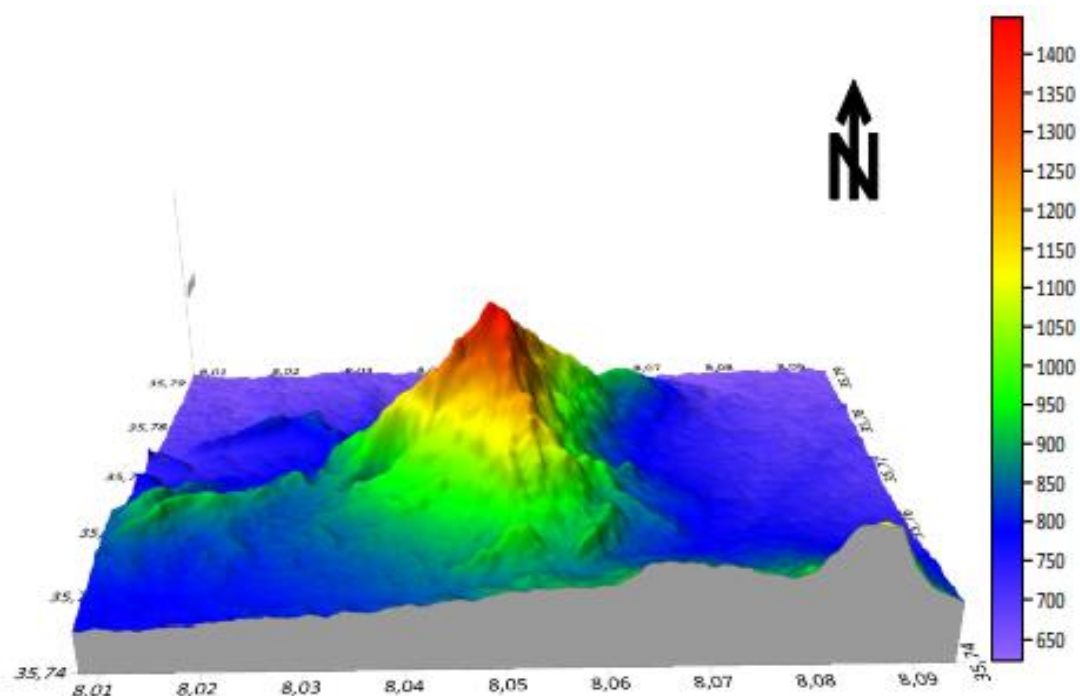


Figure 1.2 : Localisation géographique 3D de la mine de Boukhadra.

1.3 Contexte géologique et caractéristiques du gisement

1.3.1 Cadre géologique régional

Le gisement de Boukhadra s'inscrit dans une importante province métallogénique ferrifère située au Nord-Est de l'Algérie, englobant également les gisements de Ouenza et de Djerissa. Cette province est particulièrement reconnue pour l'abondance de ses formations ferrifères ainsi que pour son potentiel minier significatif, lié à une évolution géologique et tectonique complexe.

Sur le plan structural, le massif de Boukhadra est caractérisé par une structure anticlinale majeure orientée Nord-Est – Sud-Ouest. Cette configuration résulte de phases tectoniques compressives successives ayant affecté la région. L'anticlinal est affecté par un réseau de failles de directions variées, traduisant une tectonique cassante postérieure. Ces discontinuités structurales ont joué un rôle déterminant dans la mise en place de la minéralisation, en favorisant la circulation et la concentration de fluides hydrothermaux minéralisateurs.

D'un point de vue stratigraphique, les formations affleurantes appartiennent principalement à l'ère Mésozoïque, en particulier au Crétacé moyen (Aptien–Vraconien), caractérisé par des séries carbonatées et marneuses. En profondeur, ces formations reposent sur des terrains triasiques à dominante évaporitique, constitués notamment de gypse et de sel, qui ont largement influencé la structuration tectonique régionale ainsi que les processus de minéralisation.

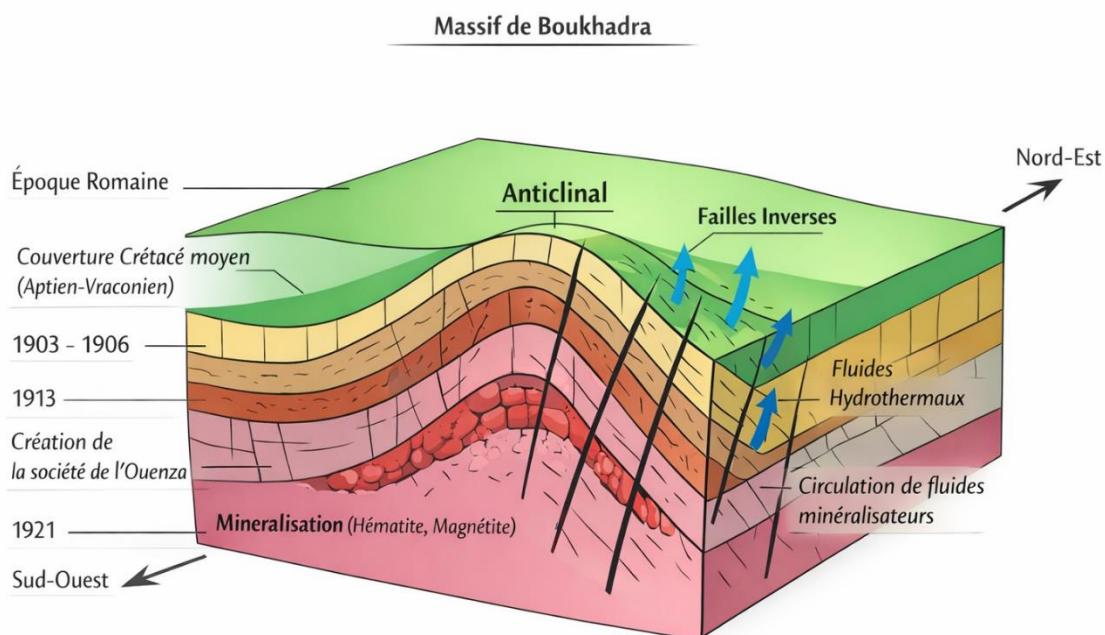


Figure 1.3 : schéma explicatif (anticlinal + failles)

1.3.2 Nature et qualité du minerai

Le minerai exploité dans la mine de Boukhadra est principalement constitué d'hématite (Fe_2O_3), qui représente la principale phase minéralogique porteuse de fer. Ce minerai se caractérise par une teneur élevée en fer, généralement supérieure à 50 %, ce qui le rend particulièrement favorable à son utilisation dans l'industrie sidérurgique.

En plus de l'hématite, le minerai renferme également des éléments accessoires, dont les principaux sont :

- la silice (SiO_2), considérée comme une gangue, pouvant influencer les propriétés métallurgiques du minerai et nécessiter des opérations de préparation ou d'enrichissement ;
- la chaux (CaO), issue principalement des formations carbonatées associées, jouant un rôle important dans les procédés de fusion en facilitant la formation du laitier.

D'un point de vue qualitatif, la richesse en fer ainsi que la nature des impuretés confèrent au minerai de Boukhadra des caractéristiques compatibles avec les exigences de l'industrie sidérurgique, notamment pour la production de fonte et d'acier. Toutefois, la présence de

certaines éléments indésirables peut nécessiter un contrôle rigoureux et, le cas échéant, des traitements préalables afin d'optimiser les performances métallurgiques.

Tableau 1.2 : Composition chimique moyenne du minerai de Boukhadra

Composant	Formule chimique	Teneur moyenne (%)
Fer total	Fe	50 – 60
Hématite	Fe ₂ O ₃	70 – 85
Silice	SiO ₂	5 – 15
Chaux	CaO	2 – 8
Alumine	Al ₂ O ₃	1 – 5
Magnésie	MgO	0.5 – 3
Phosphore	P	0.05 – 0.2
Soufre	S	0.01 – 0.1
Perte au feu (LOI)	—	2 – 6

1.3.3 Morphologie et structure du gisement

Le gisement de Boukhadra présente une morphologie lenticulaire, typique des gisements d'origine hydrothermale sédimentaire. Cette forme irrégulière implique une variabilité des dimensions et des caractéristiques du minerai.

Les principales caractéristiques géométriques sont les suivantes :

- Longueur : de 900 à 2200 mètres
- Épaisseur : de 10 à 50 mètres
- Profondeur : pouvant atteindre 480 mètres

Le gisement est subdivisé en plusieurs corps minéralisés distincts :

- le corps principal,
- le corps Nord,
- le corps Médian,
- le corps Sud.

Cette subdivision nécessite une planification rigoureuse de l'exploitation afin d'optimiser l'extraction et de minimiser les pertes.

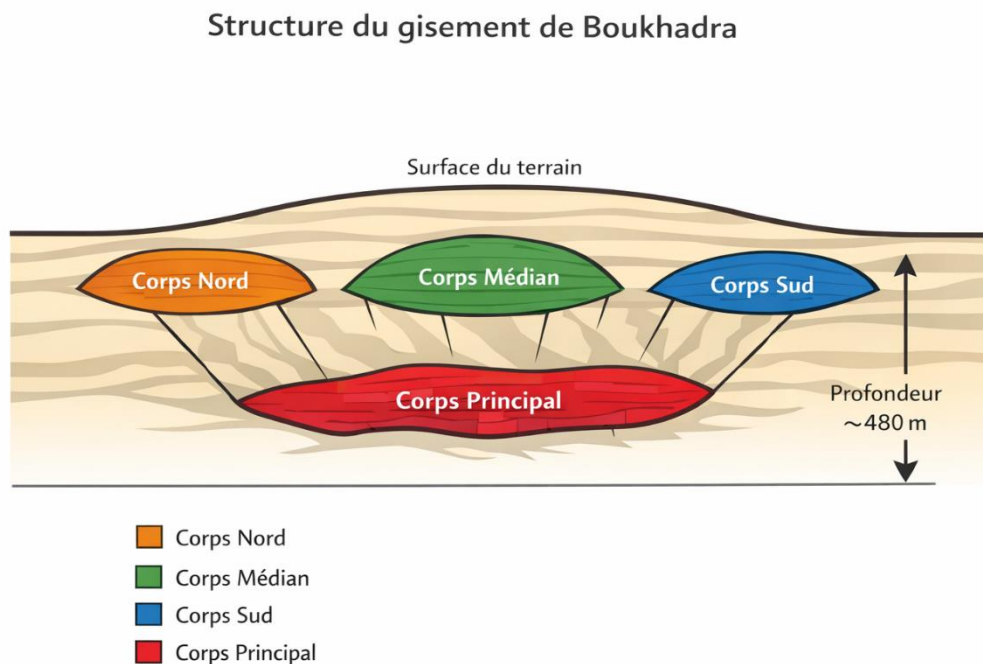


Figure 1.4 : Structure de gisement de BOUKHADRA

1.3.4 Réserves et potentiel minier

Les réserves géologiques du gisement de Boukhadra sont estimées à plusieurs dizaines de millions de tonnes de minerai de fer, ce qui en fait l'un des gisements ferrifères les plus importants à l'échelle nationale. Ces réserves se répartissent entre les zones exploitables à ciel ouvert et celles accessibles par des méthodes d'exploitation souterraine, en fonction de la profondeur, de la géométrie du gisement et des contraintes techniques.

On distingue généralement :

- les **réserves géologiques**, correspondant au volume total de minerai identifié ;
- les **réserves exploitables**, qui tiennent compte des pertes minières, de la dilution et des contraintes économiques ;
- les **ressources potentielles**, qui nécessitent des travaux complémentaires de reconnaissance pour être confirmées.

L'estimation des réserves repose sur des méthodes géostatistiques et des modèles de blocs, intégrant les données issues des campagnes de sondage, des levés géologiques et des analyses de teneur. Ces modèles permettent de mieux caractériser la distribution spatiale du minerai ainsi que les variations de qualité au sein du gisement.

Par ailleurs, la teneur relativement élevée en fer du minerai constitue un facteur favorable à la rentabilité de l'exploitation. Toutefois, celle-ci reste fortement dépendante de plusieurs paramètres, notamment :

- les conditions économiques (prix du minerai de fer sur le marché international) ;
- les coûts d'extraction et de traitement ;
- les contraintes géotechniques et hydrogéologiques ;
- les infrastructures minières disponibles.

Dans les conditions actuelles d'exploitation, la durée de vie de la mine est estimée à environ 16 ans. Cette estimation demeure toutefois évolutive et peut être prolongée grâce à :

- l'amélioration des techniques d'exploitation ;
- l'optimisation des procédés de traitement ;
- la découverte de nouvelles extensions du gisement à travers des travaux d'exploration complémentaires.

Ainsi, le potentiel minier du gisement de Boukhadra confère à ce dernier une importance stratégique majeure dans l'approvisionnement en minerai de fer à l'échelle nationale. Il joue un rôle clé dans le développement de l'industrie sidérurgique et dans la valorisation des ressources minières du pays, tout en représentant un levier économique important pour la région.

Tableau 1.3 : Classification des réserves minières.

Type de réserve	Définition	Niveau de certitude	Prise en compte des contraintes	Utilisation principale
Réserves géologiques	Quantité totale de minerai identifiée à partir	Faible à moyenne	Non	Évaluation globale du

	des données géologiques (sondages, cartographie, analyses).			potentiel du gisement
Réserves probables	Partie des réserves géologiques estimée avec un niveau de confiance raisonnable, basée sur des données d'exploration suffisantes mais encore limitées.	Moyenne	Partielle	Planification préliminaire de l'exploitation
Réserves exploitables	Partie des réserves pouvant être extraite de manière économiquement rentable, en tenant compte des pertes, de la dilution et des contraintes techniques.	Élevée	Oui	Planification opérationnelle et production

1.3.5 Les réserves globales de la mine de Boukhadra

Les réserves de la mine de Boukhadra constituent un indicateur fondamental pour l'évaluation de la viabilité économique et la planification à long terme des activités extractives. Selon les études géologiques et minières disponibles, les réserves globales du gisement sont estimées entre **45 et 50 millions de tonnes de minerai de fer**, avec une teneur moyenne supérieure à 50 % en fer, ce qui témoigne de la qualité du minerai exploité (Rouaiguia, 2019 ; ONM, 2018).

Du point de vue de la classification géologique, ces réserves sont réparties selon les catégories conventionnelles (B, C1 et C2), définies en fonction du degré de connaissance du gisement, de la densité des travaux de reconnaissance et de la fiabilité des données disponibles (Hartman, 2002). Cette classification permet d'apprécier le niveau de certitude associé aux estimations et constitue une base essentielle pour la prise de décision en matière d'exploitation.

Sur le plan spatial, les réserves sont distribuées au sein de plusieurs corps minéralisés distincts, notamment le corps principal, le corps Nord, le corps Médian et le corps Sud, ce qui

implique une gestion différenciée des zones d'exploitation et une planification adaptée aux caractéristiques de chaque compartiment.

En termes de réserves exploitables, les estimations indiquent un volume compris entre **40 et 45 millions de tonnes**, dont une fraction est accessible par exploitation à ciel ouvert, tandis que la part prédominante nécessite le recours à des méthodes d'exploitation souterraine (Boulouber & Barika, 2022). Cette répartition conditionne fortement les choix techniques et économiques liés à l'exploitation du gisement.

Par ailleurs, les travaux de prospection et les modèles géologiques récents ont mis en évidence l'existence de ressources additionnelles potentielles, estimées entre **8 et 10 millions de tonnes**, susceptibles d'être valorisées à moyen et long terme, sous réserve de conditions économiques et techniques favorables (ONM, 2018).

En définitive, le gisement de Boukhadra présente un potentiel minier significatif, garantissant la pérennité de l'exploitation sur plusieurs années et confirmant son rôle stratégique dans l'approvisionnement de l'industrie sidérurgique nationale (Hartman, 2002).

Tableau 1.4 : Répartition des réserves de la mine de Boukhadra.

Type de réserves	Catégorie géologique	Tonnage estimé (Mt)	Mode d'exploitation	Observation
Réserves prouvées	B	15 – 18	Ciel ouvert / Souterrain	Forte fiabilité géologique
Réserves probables	C1	20 – 22	Majoritairement souterrain	Bonne connaissance du gisement
Réserves possibles	C2	7 – 10	Souterrain	Incertitude plus élevée
Total réserves géologiques	B + C1 + C2	45 – 50	Mixte	Potentiel global du gisement
Réserves exploitables	—	40 – 45	Ciel ouvert + souterrain	Dépend des conditions techniques et économiques
Réserves potentielles	—	8 – 10	À déterminer	Issues de prospection

1.4 Méthode d'exploitation et organisation de la production

1.4.1 Méthode d'exploitation à ciel ouvert

L'exploitation de la mine de Boukhadra est réalisée selon une méthode à ciel ouvert, basée sur l'exploitation par gradins successifs. Cette méthode est couramment utilisée pour les gisements de surface ou sub-affleurants, notamment dans les contextes géomorphologiques accidentés tels que celui du site étudié.

Le principe d'exploitation repose sur l'extraction progressive du minerai par décapage en couches horizontales successives (gradins), avec une progression généralement orientée du sommet vers la base du gisement. Ce mode d'exploitation permet d'assurer une continuité opérationnelle tout en garantissant des conditions de travail relativement sécurisées.

Sur le plan technique, les principaux paramètres géométriques retenus sont les suivants :

- hauteur des gradins : 12 à 15 m ;
- inclinaison des talus : 75° à 80° ;
- largeur des bermes : 7 à 12 m.

1.4.2 Chaîne technologique de production

Le processus de production au niveau de la mine de Boukhadra s'inscrit dans une chaîne opératoire structurée et séquentielle, regroupant l'ensemble des opérations nécessaires à l'extraction et à l'acheminement du minerai.

1. Forage

Cette première étape consiste en la réalisation de trous de mine à l'aide d'engins de forage appropriés. Les paramètres de forage (diamètre, profondeur et maille) sont définis en fonction des caractéristiques géotechniques du massif rocheux.

2. Abattage (tir)

L'abattage est réalisé par utilisation d'explosifs, permettant la fragmentation du massif rocheux et la mise en condition du minerai pour les opérations de reprise.

3. Chargement

Le minerai abattu est ensuite repris à l'aide de pelles hydrauliques et de chargeuses, puis transféré vers les unités de transport.

4. Transport primaire

Le transport est assuré par des camions miniers de grande capacité, permettant l'acheminement du minerai vers les installations de concassage ou les zones de stockage intermédiaire.

5. Concassage

Cette opération vise la réduction granulométrique du minerai afin de le rendre compatible avec les étapes ultérieures de traitement et de manutention.

6. Transport secondaire

Le transport secondaire est généralement assuré par des convoyeurs, assurant un flux continu du minerai vers les zones de stockage.

7. Stockage et expédition

Le minerai est stocké temporairement avant son expédition vers les unités de traitement ou les destinations industrielles.

1.4.3 Organisation du travail et production

L'organisation du travail au sein de la mine repose sur un système de production en postes successifs, généralement organisé en équipes de huit heures. Ce mode d'organisation permet d'assurer la continuité des opérations sur l'ensemble du cycle d'exploitation.

Le fonctionnement du site est caractérisé par :

- la mise en place de deux à trois postes de travail par jour ;
- la continuité des opérations principales lorsque les conditions techniques le permettent
- une planification rigoureuse des activités de production et de maintenance.

La production annuelle comprend principalement :

- le minerai de fer valorisable ;
- les stériles issus des opérations de découverte ;
- la masse rocheuse totale extraite.

Une organisation efficace du travail constitue un élément fondamental pour assurer la continuité de la production, optimiser les rendements et réduire les temps d'arrêt au niveau de la chaîne opératoire.

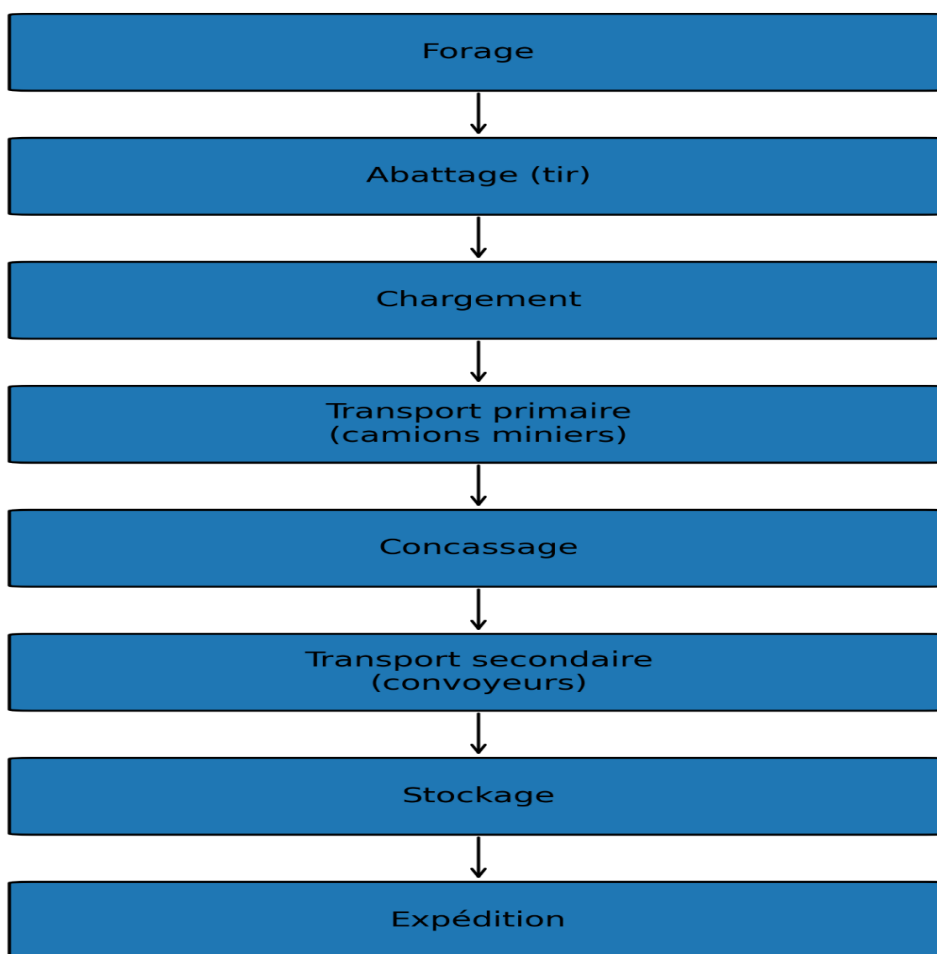


Figure 1.5 : Schéma de chaîne de production

1.4.4 Exploitation souterraine

En complément de l'exploitation à ciel ouvert, la mine de Boukhadra comporte également une exploitation souterraine, mise en œuvre pour l'extraction des zones profondes du gisement. Cette méthode permet de prolonger la durée de vie de la mine et d'assurer une meilleure valorisation des ressources minérales.

Phases d'exploitation souterraine

L'exploitation souterraine est organisée en plusieurs phases successives :

- **1ère phase** : en phase d'épuisement ;
- **2ème phase** : en phase d'épuisement ;
- **3ème phase** : en phase de développement et d'exploitation ;
- **4ème phase** : en phase de projet.

Cette organisation progressive permet d'assurer une planification rationnelle des travaux miniers, en tenant compte de l'évolution du gisement et des contraintes techniques.

Procédé d'exploitation

L'exploitation souterraine repose sur une succession d'opérations techniques similaires à celles observées en surface, mais adaptées aux conditions spécifiques du milieu souterrain.

Foration

La foration est réalisée par trous profonds à l'aide de chariots de forage spécialisés, permettant d'assurer une bonne fragmentation du massif rocheux.

Abattage

L'abattage est effectué à l'explosif, généralement par tir électrique, assurant une fragmentation contrôlée du minerai.

Chargement et transport au fond

Le chargement et le transport du minerai au niveau des blocs d'exploitation sont assurés par des pelles chargeuses transporteuses (LHD), d'une capacité moyenne de **3,8 m³**. Ces engins sont adaptés aux galeries souterraines et permettent une bonne mobilité dans des espaces restreints.

Système de transport souterrain

Le minerai extrait est acheminé selon un système combiné :

- Le minerai est déversé dans une **cheminée principale de transport** (ore pass) ;
- Il est ensuite transféré vers un niveau de roulage, caractérisé par des galeries de section supérieure à **3 m²**, creusées dans les encaissants ;
- En phase finale, le minerai est transporté vers la surface à l'aide d'un camion de type **MT 2000**, d'une capacité de **12 tonnes**.

Une fois en surface, le minerai est stocké dans un couloir avant d'être acheminé vers l'unité de concassage.

Traitement mécanique du minerai

Le traitement primaire du minerai est assuré par un concasseur giratoire, dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- **Marque** : ALLIS-CHALMERS ;
- **Type** : PM1351936 ;
- **Puissance** : 125 kW ;
- **Année de mise en service** : 1931 ;
- **Source d'énergie** : électrique ;
- **Granulométrie d'alimentation** : 250 à 300 mm.

Ce concasseur présente une capacité de traitement d'environ **300 tonnes par heure**, permettant une réduction efficace de la taille des blocs extraits.

Évacuation et transport externe

Après concassage, le minerai est transporté par **bande transporteuse** sur une distance d'environ **1 km** jusqu'aux trémies de chargement situées au niveau de la gare minière.

Le minerai est ensuite chargé dans des wagons ferroviaires d'une capacité de **60 tonnes**, puis acheminé vers le complexe sidérurgique de Mittal Steel Annaba pour traitement industriel.

L'explosif

Un explosif est une substance chimique ou un mélange capable de se transformer rapidement sous l'effet d'une impulsion extérieure (choc, chaleur ou étincelle), avec dégagement important de gaz et d'énergie.

Cette réaction provoque une explosion générant :

- une onde de choc ;
- une forte pression ;
- une fragmentation du massif rocheux.

Dans les mines à ciel ouvert, les explosifs sont utilisés pour :

- fragmenter les roches ;
- faciliter le chargement ;
- réduire les coûts d'extraction ;
- améliorer la productivité des équipements miniers.

Les explosifs les plus utilisés dans les carrières sont :

- les dynamites ;
- les explosifs ANFO ;
- les émulsions ;
- les gels explosifs.

Étude des explosifs

L'étude des explosifs permet de choisir le produit le plus adapté selon :

- la dureté des roches ;
- la fissuration du massif ;
- le diamètre des trous ;
- la hauteur du gradin ;
- les conditions de sécurité.

Les principales caractéristiques étudiées sont :

Vitesse de détonation

La vitesse de détonation représente la vitesse de propagation de l'onde explosive dans l'explosif.

Elle varie généralement entre :

- 2 000 m/s ;
- 9 000 m/s.

Une vitesse élevée améliore :

- la fragmentation ;
- la stabilité de l'explosion ;
- le rendement énergétique.

Densité

La densité influence :

- la puissance de l'explosif ;
- la quantité d'énergie dégagée ;
- la qualité de fragmentation.

Les explosifs industriels possèdent généralement une densité comprise entre 0,95 et 1,5.

Puissance et brisance

La puissance représente la capacité de l'explosif à produire un travail mécanique.

La brisance correspond à l'aptitude de l'explosif à fragmenter la roche.

Ces paramètres influencent directement :

- la granulométrie ;
- le rendement du chargement ;
- la stabilité des talus.

Plan de tir dans la mine de Boukhadra

Le plan de tir constitue une étape fondamentale dans le processus d'exploitation de la mine de Boukhadra. Il correspond à l'ensemble des paramètres techniques définis lors de la conception des tirs de mines en vue d'assurer l'abattage efficace du massif rocheux, tout en garantissant la sécurité des travailleurs, la stabilité des gradins et l'optimisation des opérations minières en aval.

Dans le contexte de la mine de Boukhadra, l'élaboration du plan de tir repose sur l'analyse des caractéristiques géologiques et géomécaniques du gisement, de la géométrie des gradins, ainsi que des exigences de production. Le dimensionnement approprié des paramètres de forage et de chargement en explosifs permet d'obtenir une fragmentation adéquate du minerai, de réduire la production de blocs surdimensionnés et d'améliorer les performances des équipements de chargement et de transport.

Tableau 1.5 : Principaux paramètres du plan de tir appliqué à la mine de Boukhadra

Paramètre	Fonction et influence sur le tir
Nombre de trous	Détermine l'étendue de la zone à abattre et le volume total de roche mobilisé par le tir.
Profondeur des trous	Conditionne la hauteur effective d'abattage et contribue à limiter la formation de talons résiduels au pied du gradin.
Diamètre des trous	Influence directement la capacité de chargement en explosifs et l'énergie libérée lors de l'explosion.
Maille de forage (Burden × Espacement)	Assure une répartition optimale de l'énergie explosive et contrôle la qualité de la fragmentation obtenue.
Inclinaison des trous	Permet d'adapter la géométrie du tir aux caractéristiques structurales du massif rocheux et d'améliorer les conditions d'abattage.
Bourrage	Garantit le confinement des gaz de détonation, favorisant ainsi une meilleure utilisation de l'énergie explosive.
Charge explosive	Représente la quantité d'explosif introduite dans les trous afin de fournir l'énergie nécessaire à la fragmentation du massif.
Retards de tir	Contrôlent la séquence de mise à feu des trous, réduisent les vibrations, améliorent la fragmentation et limitent les projections.

La performance des opérations de minage à la mine de Boukhadra dépend étroitement de la maîtrise de ces paramètres. Une conception rationnelle du plan de tir permet non seulement d'améliorer la fragmentation du minerai et des stériles, mais également d'accroître

la productivité des opérations de chargement et de transport, tout en réduisant les coûts d'exploitation et les impacts environnementaux associés aux tirs de mines.

Classification selon la vitesse de détonation

Les explosifs sont classés selon leur vitesse de détonation en deux catégories principales.

Tableau 1.6 : Classification des explosifs selon la vitesse de détonation

Type d'explosif	Caractéristiques	Vitesse de détonation
Explosifs primaires	Très sensibles aux chocs et à la chaleur	$\approx 5\,000$ m/s
Explosifs secondaires	Nécessitent un amorçage	2 000 à 9 000 m/s

Les explosifs primaires sont utilisés principalement dans :

- les détonateurs ;
- les amorces.

Les explosifs secondaires sont utilisés pour :

- le chargement des trous de mine ;
- l'abattage des roches.

L'abattage

L'abattage des roches représente la première étape des processus technologiques de l'exploitation des gisements à ciel ouvert. Il consiste à modifier l'état naturel des roches afin de faciliter leur extraction, leur chargement et leur transport.

Les travaux de forage et de tir sont largement utilisés dans les mines et carrières pour l'extraction des roches semi-dures et dures. L'organisation de ces travaux influence directement le rendement des engins de chargement, des sondeuses et des moyens de transport.

La fragmentation des roches par explosion constitue la méthode la plus répandue dans les exploitations minières à ciel ouvert. Elle permet de préparer les roches de forte dureté pour les opérations ultérieures.

La qualité de l'abattage dépend principalement :

- du choix des explosifs ;
- de la quantité d'explosif utilisée ;
- du plan de tir adopté ;
- des paramètres géométriques des trous de mine.

Les travaux d'abattage comprennent généralement :

- l'implantation des trous de forage ;
- la foration ;
- le chargement des explosifs ;
- le bourrage ;
- le tir.

1.4.5 Contraintes spécifiques du site

L'exploitation du gisement est soumise à un ensemble de contraintes naturelles et opérationnelles qui influencent directement les performances techniques et économiques du système de production. Ces contraintes doivent être prises en compte dans la planification minière afin d'assurer une exploitation optimale et sécurisée.

1.4.4 Contraintes topographiques

Le site d'exploitation se caractérise par un relief montagneux marqué, engendrant des conditions d'accès et de circulation relativement complexes. Les pentes élevées, les irrégularités du terrain ainsi que la présence de zones escarpées imposent des limitations techniques aux engins miniers.

Ces conditions nécessitent la réalisation d'aménagements spécifiques, tels que :

- la conception de pistes adaptées (largeur, pente et rayon de courbure) ;
- la stabilisation des talus ;
- l'optimisation des profils de circulation afin de garantir la sécurité et la productivité.

Par conséquent, la topographie constitue un facteur déterminant dans le dimensionnement du système Pelle–Camion.

1.4.5 Contraintes climatiques

Les conditions climatiques du site ont un impact significatif sur le déroulement des opérations minières. Les variations de température et les conditions environnementales extrêmes influencent directement la performance des équipements et la sécurité des opérations.

Les principales contraintes observées sont :

- les températures élevées, qui accélèrent l'usure des composants mécaniques et augmentent les besoins en maintenance ;
- les périodes de froid, susceptibles d'affecter les performances des moteurs et des systèmes hydrauliques ;
- la présence de poussières, qui réduit la visibilité, dégrade les conditions de travail et favorise l'encrassement des équipements.

Ces facteurs nécessitent la mise en place de mesures d'adaptation, telles que l'entretien renforcé des équipements et l'arrosage régulier des pistes.

1.4.6 Contraintes liées aux pistes de roulage

Les pistes de roulage constituent un élément essentiel du système de transport dans les exploitations à ciel ouvert. Leur état conditionne directement l'efficacité du système Pelle–Camion.

Une dégradation des pistes peut entraîner :

- une augmentation des temps de cycle des camions ;
- une surconsommation de carburant ;
- une usure prématurée des pneumatiques et des organes mécaniques ;
- une diminution de la vitesse de circulation et une hausse des risques d'accidents.

Ainsi, la maintenance régulière des pistes (nivellement, arrosage, compactage) est indispensable pour garantir des conditions de circulation optimales.

1.4.7 Contraintes techniques et organisationnelles

Outre les contraintes naturelles, l'exploitation est également confrontée à des contraintes d'ordre technique et organisationnel, liées à la gestion des équipements et des opérations.

Les principales difficultés identifiées sont :

- la fréquence des pannes mécaniques, affectant la disponibilité des engins ;
- les temps d'attente des camions au niveau des points de chargement ou de déchargement ;
- le manque de synchronisation entre les opérations de chargement et de transport ;
- une gestion parfois inefficace de la flotte d'équipements.

Ces contraintes traduisent la nécessité d'une amélioration des pratiques de gestion et de planification, notamment à travers l'utilisation d'outils d'optimisation et de systèmes de gestion de flotte.

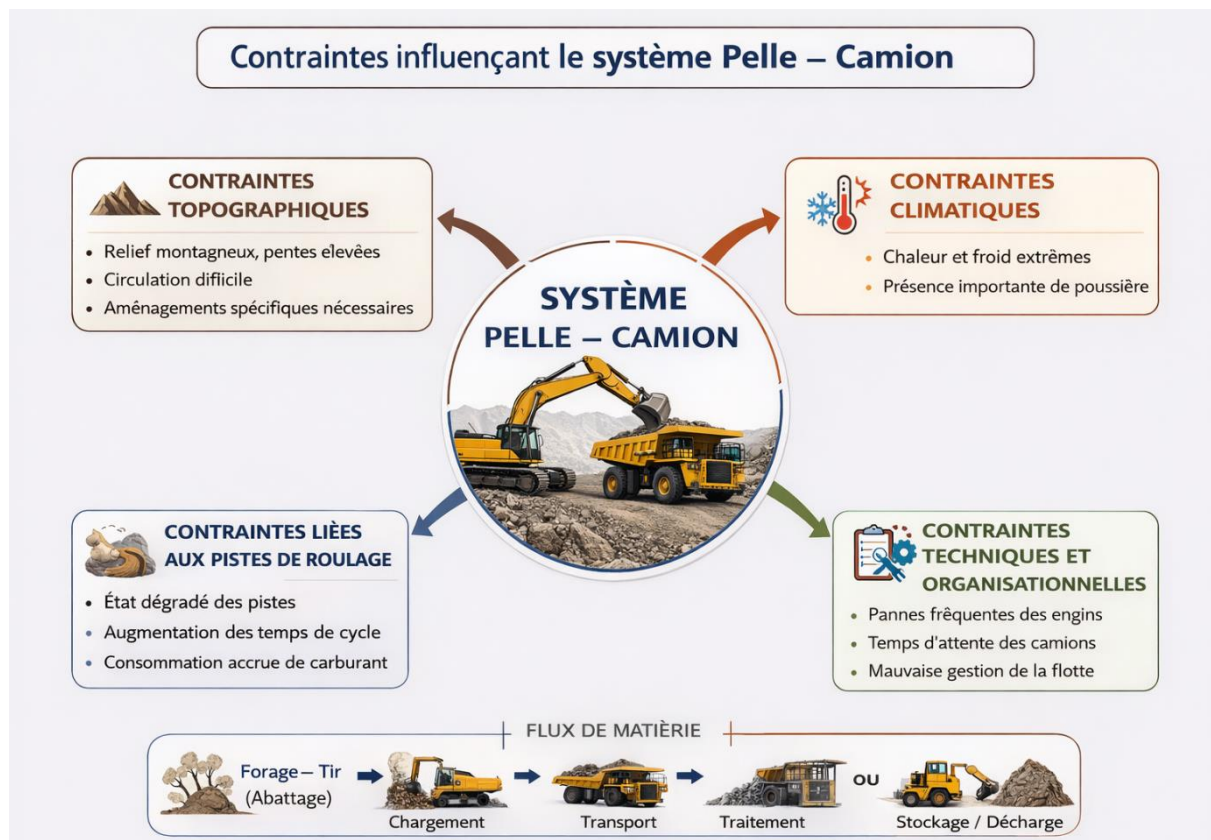


Figure 1.6 : Schéma des contraintes impactant le système Pelle–Camion

2. Chapitre 2 – Etude de processus chargement et transport

2.1 Chargement et transport dans les Mines ciel ouvert

Dans les exploitations minières à ciel ouvert, les opérations de chargement et de transport constituent des sous-systèmes critiques du processus de production, assurant le déplacement du matériau fragmenté depuis les fronts d'abattage vers les installations de traitement ou de stockage. Ces opérations s'inscrivent dans une chaîne logistique intégrée dont la performance globale dépend fortement de l'efficacité de chaque maillon (*SME, 2011*).

Du point de vue de l'ingénierie des systèmes miniers, le chargement et le transport sont caractérisés par des cycles opérationnels interdépendants, dont l'optimisation repose sur la maîtrise de plusieurs paramètres clés, notamment : le temps de cycle des engins, la capacité des équipements, les distances de transport, les conditions géométriques des pistes (pente, rayon de courbure), ainsi que les caractéristiques physico-mécaniques du matériau (*Hartman & Mutmansky, 2002*).

L'efficacité du système est généralement évaluée à travers des indicateurs de performance tels que le rendement horaire, le taux d'utilisation des équipements et les temps d'attente au niveau des points de chargement et de déchargement. Une désynchronisation entre les capacités de chargement et de transport peut engendrer des pertes de productivité significatives (*SME, 2011*).

Par conséquent, une approche d'optimisation intégrée est requise, basée sur l'équilibrage des flux (matching pelle-camion), la réduction des temps morts et l'amélioration de l'organisation du trafic minier. Cette approche permet d'assurer une exploitation rationnelle des équipements, une réduction des coûts opérationnels et une maximisation de la production (*Hartman & Mutmansky, 2002*).

2.1.1 Chargement

Le chargement constitue une opération unitaire fondamentale dans les systèmes d'exploitation minière à ciel ouvert. Il consiste à reprendre le matériau fragmenté issu des opérations d'abattage (minerai ou stérile) et à le transférer vers les unités de transport, assurant ainsi la continuité du flux de production (*Hartman & Mutmansky, 2002*).

But du chargement

Du point de vue de l'ingénierie des systèmes miniers, l'opération de chargement vise à :

- assurer une alimentation continue et régulière des engins de transport ;
- maximiser le rendement horaire des équipements de chargement ;
- minimiser les temps morts et les temps d'attente dans le cycle d'exploitation ;
- optimiser le taux de remplissage des camions (payload efficiency) ;
- garantir une adéquation optimale entre les capacités de chargement et de transport.

Engins utilisés

Les opérations de chargement sont réalisées à l'aide d'engins spécialisés, dont le choix dépend des conditions géologiques, de la géométrie du gisement et des objectifs de production.

Les principaux équipements utilisés sont :

- **pelles hydrauliques** : caractérisées par une grande précision, une flexibilité opérationnelle et un rendement élevé ;
- **chargeuses sur pneus** : adaptées aux opérations nécessitant une grande mobilité ;
- **pelles à câbles** : utilisées dans certaines exploitations de grande envergure.

Paramètres techniques du chargement

Les performances du chargement sont conditionnées par plusieurs paramètres techniques :

- capacité du godet C (m^3) ;
- facteur de remplissage F (généralement compris entre 0,8 et 1,1) ;
- temps de cycle de la pelle T_c (s) ;
- caractéristiques du matériau (densité, fragmentation, humidité) ;
- conditions opératoires (angle d'attaque, positionnement du camion).

Le rendement théorique d'une pelle peut être exprimé par la relation suivante :

$$Q = \frac{C \times F \times 3600}{T_c}$$

où :

- Q : production (m³/h)
- C : capacité du godet
- F : facteur de remplissage
- T_c : temps de cycle

Cycle de chargement

Le cycle de chargement d'une pelle hydraulique comprend les phases suivantes :

1. excavation (remplissage du godet) ;
2. rotation en charge ;
3. déversement dans le camion ;
4. rotation à vide.

La durée du cycle varie généralement entre **20 et 40 secondes**, en fonction des conditions d'exploitation (*SME, 2011*).

Classification des godets utilisés dans les engins de chargement

Dans les exploitations minières à ciel ouvert, le godet constitue l'organe principal de reprise et de chargement du matériau. Ses caractéristiques géométriques et fonctionnelles influencent directement la productivité des équipements de chargement, la qualité du remplissage ainsi que les temps de cycle.

Les godets peuvent être classés selon leur mode de fonctionnement en deux grandes catégories : les **godets simples** et les **godets multiples**.

Les godets simples sont constitués d'un seul compartiment de chargement. Ils sont principalement utilisés sur les pelles hydrauliques, les chargeuses et certains équipements d'excavation.

Godet simple : Ce type de godet est particulièrement adapté :

- aux opérations de chargement classiques ;
- aux matériaux fragmentés ;
- aux exploitations nécessitant une grande précision de chargement.

Les performances des godets simples dépendent principalement :

- de leur capacité volumique ;
- de la nature du matériau ;

- du facteur de remplissage ;
- et des conditions de fragmentation.

Godet multiple : Les godets multiples sont composés de plusieurs compartiments ou organes de chargement fonctionnant simultanément ou successivement. Ils sont principalement utilisés sur les excavateurs à roue-pelle, les draglines et certains systèmes continus de manutention.

Ce type de godet permet :

- une extraction continue du matériau ;
- une augmentation du débit de production ;
- une meilleure régularité du flux de matière.

Les godets multiples sont généralement employés dans les grandes exploitations minières ou dans les systèmes de production continue nécessitant des cadences élevées.

Tableau 2.1 : Classification des engins de chargement.

Type de godet	Caractéristiques principales	Avantages	Applications
Godet simple	Un seul compartiment de chargement	Simplicité, précision, flexibilité	Pelles hydrauliques, chargeuses
Godet multiple	Plusieurs compartiments ou godets successifs	Débit élevé, chargement continu	Roue-pelle, draglines, systèmes continus

2.1.2 Transport

Le transport minier constitue un sous-système essentiel de la chaîne de production dans les exploitations à ciel ouvert. Il regroupe l'ensemble des opérations assurant le déplacement du matériau chargé depuis les fronts d'abattage vers les unités de traitement, les zones de stockage ou les dépôts de stériles.

Du point de vue de l'ingénierie minière, le transport représente un maillon critique du système global, dont la performance influence directement la productivité et les coûts d'exploitation (SME, 2011).

Les moyens de transport

Tableau 2.2 : Principaux engins de chargement et de transport utilisés en exploitation minière.

Engin	Type	Fonction principale	Caractéristiques générales
Caterpillar 775G	Camion minier rigide	Transport du minerai et du stérile	Capacité élevée, adapté aux longues distances et pistes minières
Caterpillar 966	Chargeuse sur pneus	Chargement et manutention	Grande mobilité, chargement rapide
Caterpillar 986	Chargeuse sur pneus lourde	Chargement de grande capacité	Utilisée pour matériaux massifs et rendement élevé
Komatsu PC990LC-10	Pelle hydraulique	Excavation et chargement	Pelle de grande capacité utilisée en mine à ciel ouvert



Caterpillar 775G



Caterpillar 966



Caterpillar 986



Komatsu PC990LC-10

Figure 2.1 : Principaux équipements de chargement et de transport utilisés dans le système Pelle–Camion.

But du transport

L'opération de transport vise à :

- assurer la continuité et la régularité du flux de production ;
- minimiser les temps de cycle des engins (aller-retour) ;
- optimiser les coûts liés au déplacement des matériaux ;
- garantir la sécurité des circulations sur le site minier ;

- améliorer le taux d'utilisation des équipements de transport.

Paramètres techniques du transport

Les performances du transport dépendent de plusieurs paramètres fondamentaux :

- capacité du camion C (t ou m^3) ;
- distance de transport D (km) ;
- vitesse en charge V_c et à vide V_v ;
- temps de chargement et de déchargement ;
- état des pistes (pente, rugosité, largeur) ;
- conditions d'exploitation (climat, trafic).

Cycle de transport

Le cycle de transport d'un camion minier comprend les phases suivantes :

1. chargement au niveau de la pelle ;
2. transport en charge vers le point de déversement ;
3. déchargement ;
4. retour à vide vers le front d'exploitation.

Le temps de cycle total est exprimé par :

$$T = T_{ch} + T_{tc} + T_d + T_{tv}$$

où :

- T_{ch} : temps de chargement
- T_{tc} : temps de transport chargé
- T_d : temps de déchargement
- T_{tv} : temps de retour à vide

Rendement du transport

Le rendement théorique d'un camion peut être estimé par :

$$Q = \frac{C \times 3600}{T}$$

où :

- Q : production (t/h)
- C : capacité du camion
- T : temps de cycle total

Classification des moyens de transport

Tableau 2.3 : Classification des moyens de transport.

Type de transport	Moyens utilisés
Transport discontinu	Camions miniers, tombereaux articulés
Transport continu	Convoyeurs à bande
Transport mixte	Camions + convoyeurs

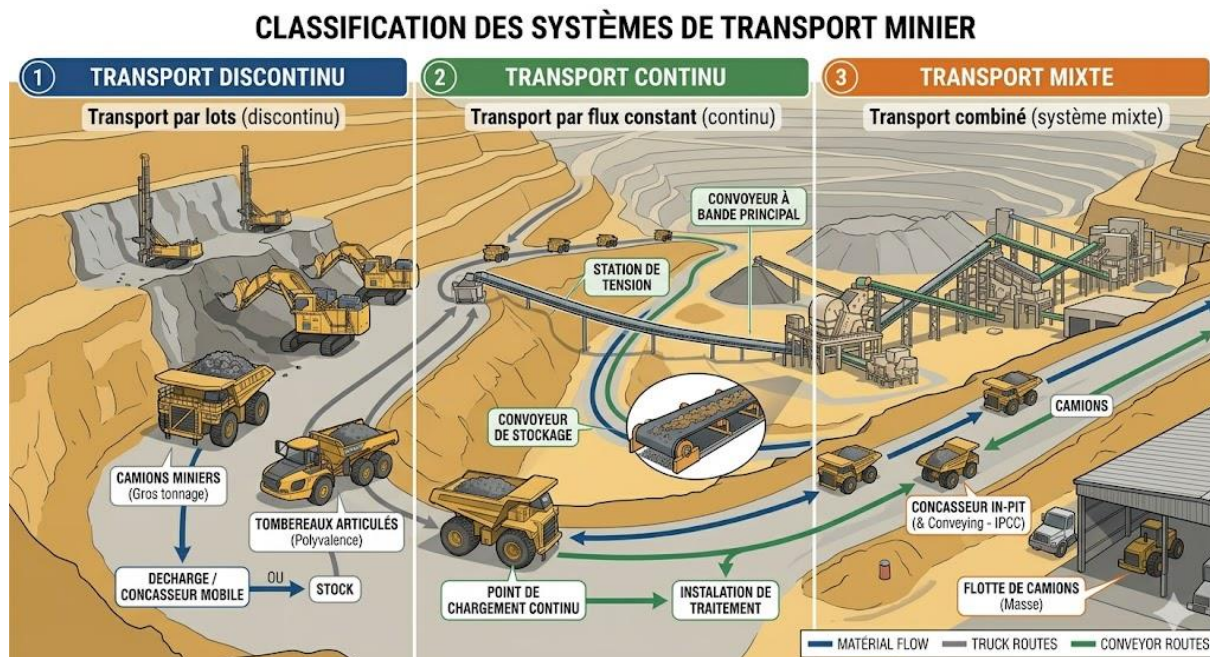


Figure 2.2 : Classification des systèmes de transport minier.

2.2 Place du système Pelle–Camion dans la chaîne de valeur

Dans les exploitations minières à ciel ouvert, le système Pelle–Camion constitue l'un des piliers fondamentaux de la chaîne de production. Il assure la continuité entre les opérations amont, notamment le forage et le tir, et les opérations aval telles que le traitement du minerai, le stockage ou la mise en terril des stériles. À ce titre, il joue un rôle déterminant dans la performance globale de l'exploitation.

Sur le plan fonctionnel, ce système repose sur l'interaction entre deux composantes principales : les engins de chargement (pelles hydrauliques ou électriques) et les unités de transport (camions miniers). Il permet d'assurer successivement l'extraction du matériau abattu, son chargement, puis son acheminement vers les différentes destinations (concasseurs, installations de traitement ou zones de dépôt).

Du point de vue économique, le système Pelle–Camion représente une part significative des coûts d'exploitation, pouvant atteindre 50 à 60 % des coûts totaux. Cette importance s'explique par les dépenses liées à l'acquisition des équipements, à leur maintenance, à la consommation de carburant, ainsi qu'aux coûts de main-d'œuvre. Par conséquent, toute amélioration de son efficacité se traduit directement par un gain de productivité et une réduction des coûts unitaires.

La performance du système dépend de plusieurs paramètres interdépendants, parmi lesquels :

- **le temps de cycle** : incluant le temps de chargement, de transport, de déchargement et de retour à vide ;
- **le facteur de correspondance (matching factor)** entre la pelle et les camions, garantissant un équilibre optimal entre chargement et transport ;
- **la capacité des équipements** : volume du godet de la pelle et charge utile des camions ;
- **l'état et la géométrie des pistes** : pente, largeur, rayon de courbure et qualité de roulement influençant la vitesse et la sécurité ;
- **la disponibilité mécanique et l'utilisation des équipements** : taux de panne, temps d'arrêt et efficacité opérationnelle ;
- **la gestion et la planification** : affectation dynamique des camions, organisation des flux et systèmes de dispatching.

En outre, des indicateurs de performance sont couramment utilisés pour évaluer l'efficacité du système, tels que :

- la productivité (tonnes/heure) ;
- le coût de transport par tonne ;
- le taux d'utilisation des équipements ;
- le temps d'attente des camions et des pelles.

Toute défaillance dans l'un de ces paramètres peut entraîner des déséquilibres dans la chaîne de production, se traduisant par des temps morts, une sous-utilisation des équipements ou une congestion au niveau des points de chargement et de déchargement.

Par ailleurs, les avancées technologiques récentes, telles que les systèmes de gestion de flotte (Fleet Management Systems), la géolocalisation (GPS) et l'automatisation partielle des équipements, contribuent à améliorer significativement l'efficacité du système Pelle-Camion. Ces outils permettent une meilleure coordination des opérations, une réduction des temps d'attente et une optimisation des itinéraires de transport.

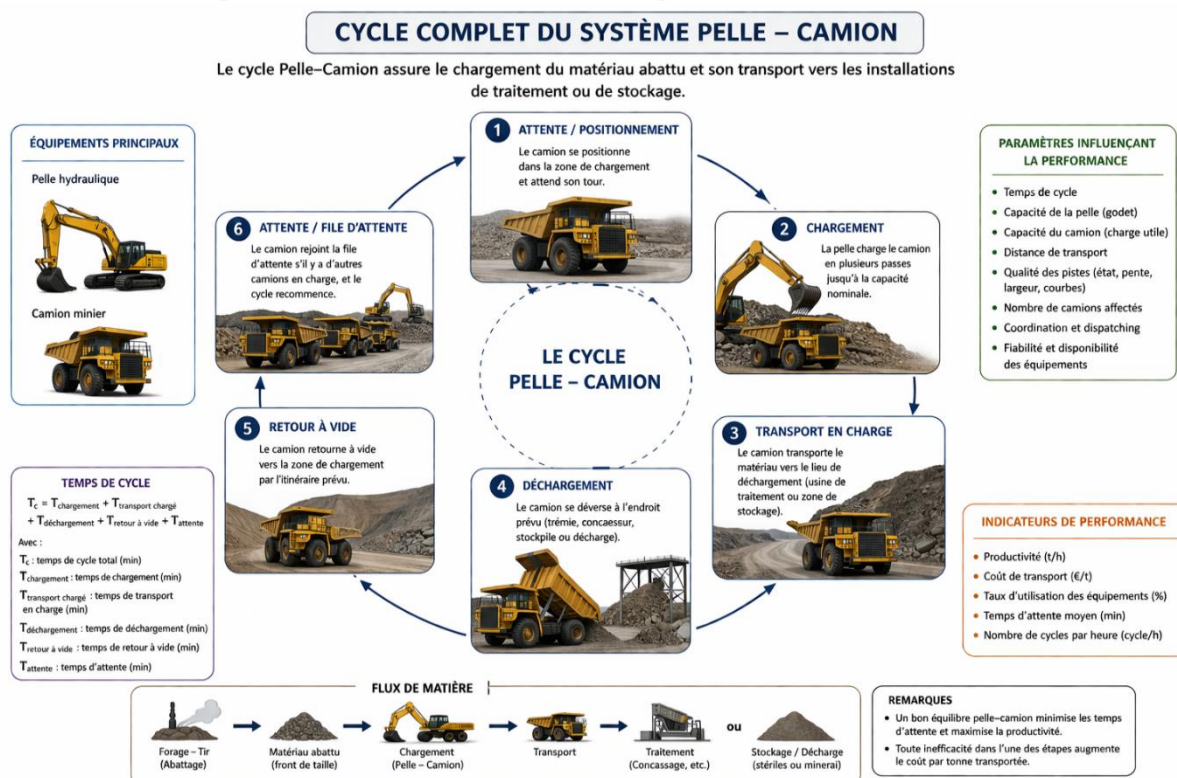


Figure 2.3 : Schéma complet du cycle Pelle-Camion

Ainsi, le système Pelle–Camion ne se limite pas à une simple opération de transport, mais constitue un levier stratégique d’optimisation technico-économique, influençant directement la rentabilité, la productivité et la durabilité de l’exploitation minière.

Équations clés et indicateurs de performance du système Pelle–Camion :

L’évaluation des performances du système Pelle–Camion repose sur un ensemble d’indicateurs quantitatifs permettant de caractériser l’efficacité opérationnelle des équipements et l’optimisation du processus de production.

- **Productivité Pelle (t/h)**

$$Q_p = \frac{C_g \times F \times N \times 3600}{T_c}$$

où :

- Q_p : productivité de la pelle (t/h ou m³/h)
- C_g : capacité nominale du godet (m³)
- F : facteur de remplissage du godet (-)
- N : nombre de passes nécessaires pour charger un camion
- T_c : temps de cycle de la pelle (s)

Cette relation met en évidence l’influence directe du temps de cycle et du facteur de remplissage sur la performance de chargement.

- **Taux d'utilisation** : Le taux d’utilisation permet d’évaluer l’efficacité d’exploitation d’un équipement :

$$U = \frac{T_p}{T_o}$$

où :

- U : taux d’utilisation
- T_p : temps productif

- To : temps opérationnel total

Un faible taux d'utilisation traduit des pertes liées aux arrêts, aux attentes ou aux dysfonctionnements.

- **Indicateur OEE (Overall Equipment Effectiveness)** : L'OEE constitue un indicateur synthétique de performance industrielle intégrant trois composantes :

$$OEE = A \times P \times Q$$

où :

- A : disponibilité (Availability)
- P : performance (Performance)
- Q : qualité (Quality)

Dans le cas étudié, l'OEE global observé est de l'ordre de **85 %**, ce qui reflète un niveau de performance satisfaisant pour une exploitation minière à ciel ouvert.

Tableau 2.4 : KPIs du système (données observées sur site Boukhadra)

Indicateur	Pelle	Camion	Objectif
Disponibilité (%)	92	88	>90
Performance (%)	96	93	>95
Qualité (%)	99	98	>98
OEE (%)	87	80	>85

Analyse technique des résultats :

L'analyse des indicateurs met en évidence que :

- la **pelle hydraulique** présente un OEE de **87 %**, supérieur à l'objectif fixé, traduisant une bonne maîtrise des opérations de chargement ;
- les **camions miniers** affichent un OEE de **80 %**, inférieur au seuil cible, ce qui indique des marges d'amélioration, notamment en termes de disponibilité et de gestion des temps de cycle ;

- la différence de performance entre les deux équipements suggère un **déséquilibre du système Pelle–Camion**, pouvant entraîner des temps d’attente ou une sous-utilisation des ressources.

D’un point de vue d’ingénierie, ces résultats confirment que l’optimisation du système doit porter prioritairement sur :

- la réduction des temps d’arrêt des camions,
- l’amélioration des conditions de roulage,
- et l’ajustement du nombre de camions pour atteindre un équilibre optimal.

2.3 Description des pelles utilisées

Dans le cadre de l’exploitation à ciel ouvert de la mine de Boukhadra, les opérations de chargement sont assurées principalement par des pelles hydrauliques de grande capacité, adaptées aux conditions géomécaniques du gisement caractérisé par des bancs relativement durs (minerai phosphaté et stérile compact).

Ces équipements se distinguent par leur puissance élevée, leur capacité de production importante et leur aptitude à fonctionner dans des environnements contraignants. Le choix de ce type de pelle repose sur des critères techniques tels que la fragmentation du matériau, la hauteur des gradins et les objectifs de production.

Caractéristiques techniques (Pelle étudiée) :

Les caractéristiques principales de la pelle considérée (type Komatsu PC990LC-10 ou équivalent Caterpillar 990K) sont les suivantes :

- **Capacité du godet** : 9,9 m³ (soit environ 18 à 20 tonnes selon la densité du matériau) ;
- **Puissance installée** : de l’ordre de 700 kW ;
- **Rayon de travail** : compris entre 12 et 15 m ;
- **Type de fonctionnement** : pelle hydraulique à excavation frontale ;
- **Adaptation** : exploitation de matériaux durs et semi-compacts.

Cycle de chargement

Le cycle de chargement d'une pelle hydraulique est constitué de quatre phases principales :

1. **Creusage (excavation)** : pénétration du godet dans le matériau ;
2. **Élévation (levage)** : remontée du godet chargé ;
3. **Rotation (swing)** : déplacement vers le point de déversement ;
4. **Déversement** : vidange du godet dans la benne du camion.

Le temps de cycle dépend des conditions d'exploitation (fragmentation, position du camion, compétence de l'opérateur), et varie généralement entre **25 et 35 secondes par passe**.

Dans le cas étudié, le temps moyen observé est de **32 secondes**, ce qui correspond à des conditions d'exploitation normales au niveau 934 m.



Figure 2.4 : Pelle PC990LC en opération

Analyse statistique du cycle de chargement

Tableau 2.5 : Cycle de chargement Pelle (observations 10 cycles)

Phase	Temps moyen (s)	Écart-type (s)
Creusage	10,5	1,2
Élévation	8,2	0,8
Rotation 180°	9,8	1,5
Déversement	6,5	0,9
Total/passe	35	2,1

L'analyse des données montre que :

- la phase de **creusage** représente la part la plus importante du cycle, en raison de la résistance mécanique du matériau ;
- la phase de **rotation** présente une variabilité plus élevée (écart-type = 1,5 s), liée aux conditions de positionnement du camion ;
- le temps total de cycle (≈ 35 s) reste conforme aux standards industriels pour ce type d'équipement.

Du point de vue de l'optimisation, les gains de productivité peuvent être obtenus par :

- l'amélioration de la fragmentation (réduction du temps de creusage),
- l'optimisation du positionnement des camions (réduction du temps de rotation),
- et la formation des opérateurs pour stabiliser les cycles.

2.4 Description de la flotte de camions

Dans le cadre de l'exploitation à ciel ouvert de la mine de Boukhadra, le transport du matériau est assuré par une flotte de camions miniers hors-route (dumpers), conçus pour opérer dans des conditions sévères caractérisées par des pistes à forte pente ($>10\%$), des distances de transport variables (2 à 5 km) et des charges élevées.

Ces équipements jouent un rôle déterminant dans la performance globale du système Pelle–Camion, leur dimensionnement et leur gestion influençant directement les temps de cycle et la productivité de l’exploitation.

Caractéristiques techniques :

Les camions utilisés sont de type Belaz 7547 ou équivalent, avec une flotte typique de **4 à 6 camions par pelle**, selon les conditions d’exploitation.

Les principales caractéristiques sont :

- **Capacité de charge utile** : 65 à 90 tonnes (≈ 40 à 50 m^3) ;
- **Puissance moteur** : comprise entre 800 et 1200 kW ;
- **Vitesse maximale** : jusqu’à 50 km/h (≈ 30 km/h en charge) ;
- **Type de transport** : discontinu, adapté aux terrains accidentés ;
- **Adaptabilité** : bonne performance sur pistes sinueuses et conditions difficiles.

Cycle de transport

Le cycle de transport d’un camion minier est constitué de quatre phases principales :

1. **Chargement** : positionnement sous la pelle et remplissage (≈ 2 min) ;
2. **Transport en charge** : déplacement vers le point de déversement (≈ 5 à 8 min) ;
3. **Déchargement** : basculement de la benne (≈ 1 min) ;
4. **Retour à vide** : retour vers le front d’exploitation (≈ 4 min).

Le temps total de cycle varie généralement entre **12 et 15 minutes**, en fonction des conditions de roulage et de la distance de transport.



Figure 2.5 : Flotte camions et pistes

Analyse du cycle de transport

Tableau 2.6 : Cycle transport Camion (moyenne 20 cycles)

Phase	Temps (min)	Distance (km)
Chargement	2,0	-
Transport chargé	5,5	2,5
Déchargement	1,2	-
Retour vide	4,0	2,5
Total/cycle	12,7	5

Influence de la fragmentation sur le cycle

La granulométrie du matériau après abattage a un impact direct sur le cycle de chargement et, par conséquent, sur la performance du transport.

Tableau 2.7 : Influence de la fragmentation sur le rendement du système.

Classe	Fragmentation	Nb passes	Ex. : Roche dure (classe III)
I (Bonne)	Fine (<0,5m)	3	95% remplissage
II (Moyenne)	Moyenne	4	90%
III (Dure)	Grossière	5-6	85%

L'analyse des données met en évidence que :

- la phase de **transport en charge** représente la part dominante du cycle (~43 %), constituant ainsi le principal levier d'optimisation ;
- le **temps de retour à vide** est significatif (~31 %), ce qui souligne l'importance de l'optimisation des pistes ;
- la **fragmentation du matériau** influence directement le nombre de passes, ce qui impacte le temps de chargement et la productivité globale.

D'un point de vue opérationnel, l'amélioration des performances du transport peut être obtenue par :

- l'optimisation du tracé et de l'entretien des pistes,
- la réduction des distances de transport,
- l'amélioration de la fragmentation par un tir plus efficace,
- et une meilleure adéquation entre la capacité des camions et celle de la pelle.

2.5 Adéquation Pelle–Camion

L'adéquation entre la pelle hydraulique et la flotte de camions constitue un facteur déterminant dans l'optimisation de la productivité globale d'une exploitation minière à ciel ouvert. Elle vise à assurer une synchronisation optimale entre les cycles de chargement et de

transport, afin de minimiser les temps d'attente (idle time) et d'éviter les phénomènes de congestion ou de sous-utilisation des équipements.

D'un point de vue systémique, l'adéquation Pelle–Camion s'analyse comme un problème d'équilibrage des flux, où l'objectif est d'atteindre un taux de correspondance (matching factor) proche de l'unité.

Paramètres clés observés :

Les observations réalisées sur le site de Boukhadra permettent de définir les paramètres suivants :

- **Nombre moyen de passes** : 4 passes (matériaux de classe II) ;
- **Facteur de remplissage** : 92 %, avec une sursurcharge limitée à 5 % afin d'éviter la dilution et les pertes ;
- **Temps de cycle camion** : 12,7 minutes ;
- **Temps de chargement par camion** :

$$T_{ch} = \frac{4 \times 35}{60} \approx 2.3 \text{ min}$$

Détermination du nombre optimal de camions

Le nombre optimal de camions par pelle est déterminé par la relation suivante :

$$N = \frac{T_{cycle_camion}}{T_{chargement}} \times K$$

où :

- N : nombre de camions
- T_{cycle_camion} : temps de cycle camion
- $T_{chargement}$: temps de chargement par camion
- K : facteur de sécurité ($\approx 1,1$)

Application numérique :

$$N = \frac{12,7}{2,3} \times 1,1 \approx 6$$

Nombre optimal ≈ 6 camions par pelle

Analyse de scénarios d'adéquation

Tableau 2.8 : Simulation adéquation

Scénario	Nb Camions	Productivité Pelle (t/h)	Utilisation (%)
Sous-équipé	3	450	60
Optimal	5 - 6	850	92
Sur-équipé	8	850	98 (pelle max)

L'analyse des résultats met en évidence trois régimes de fonctionnement :

- **Régime sous-équipé :**
La pelle subit des temps d'attente importants en raison du manque de camions, entraînant une perte de productivité pouvant atteindre **30 %**.
- **Régime optimal :**
L'équilibre entre les cycles de chargement et de transport permet d'atteindre un taux d'utilisation élevé ($\approx 92 \%$) et une productivité maximale.
- **Régime sur-équipé :**
L'excès de camions engendre des files d'attente au niveau de la pelle, sans gain de production, mais avec une augmentation des coûts d'exploitation (carburant, usure).

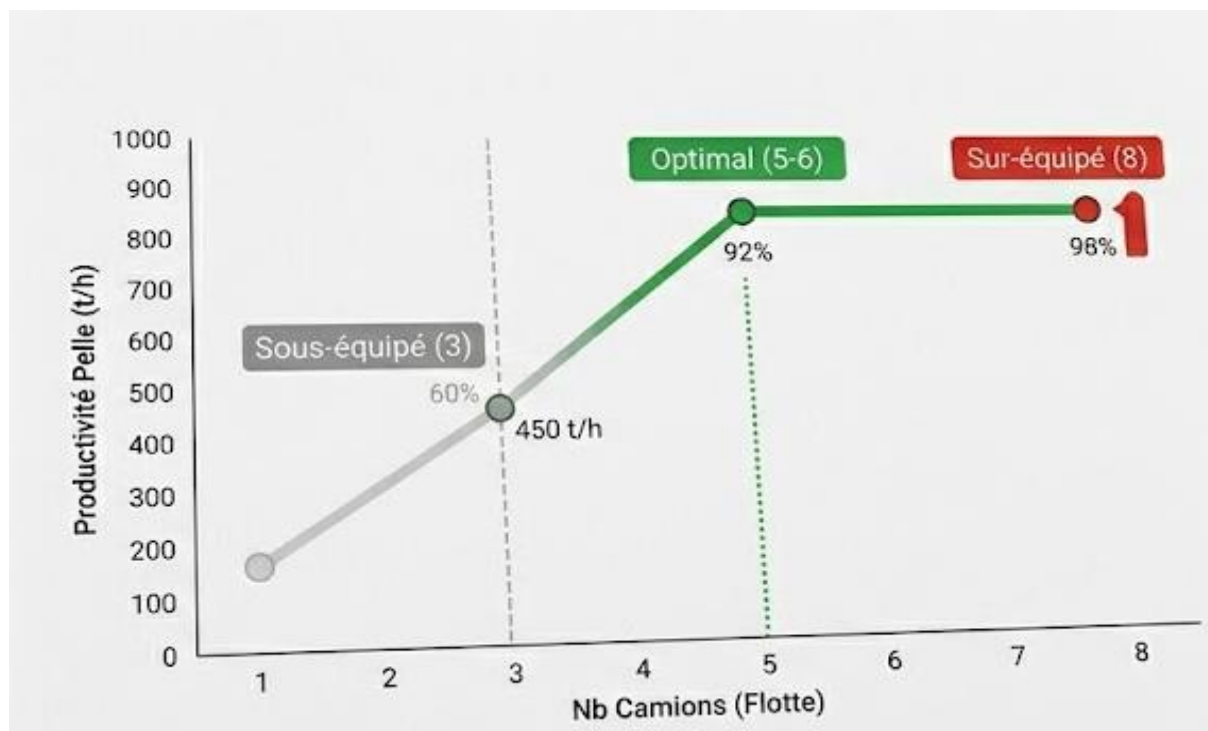


Figure 2.6 : Courbe d'adéquation (Taux matching)

Conséquences de la non-adéquation

Une mauvaise adéquation Pelle–Camion peut entraîner :

- une sous-utilisation des équipements de chargement (pelle idle) ;
- une congestion au niveau des zones de chargement ;
- une augmentation de la consommation énergétique (jusqu'à +20 %) ;
- des pertes de matériau (spillage) et des phénomènes de dilution.

Synthèse et optimisation

Les résultats obtenus montrent que le système Pelle–Camion de la mine de Boukhadra présente une adéquation globalement satisfaisante, avec un OEE supérieur à 85 %. Toutefois, des marges d'amélioration subsistent, notamment par :

- la réduction du nombre de passes grâce à une meilleure fragmentation ;
- l'optimisation du nombre de camions (≈ 5 à 6 camions par pelle) ;
- l'amélioration des conditions de circulation pour réduire les temps de cycle.

3. Chapitre 3 : analyse opérationnelle et amelioration du couple pelle-camion de la mine de boukhadra

3.1 Introduction

Dans les opérations minières à ciel ouvert, le gisement se caractérise par une dispersion géographique des matériaux extraits et des points de destination (verses à stériles, installations de concassage ou stocks de minerai). Dans ce contexte, l'importance du chargement et du transport est capitale : ces processus représentent généralement la part la plus élevée des coûts opératoires globaux d'une mine et conditionnent directement le débit de production global du site. La rentabilité de l'exploitation repose donc sur la synchronisation et la performance maximale du couple indissociable formé par l'unité de chargement (la pelle) et les unités de transport (la flotte de camions).

Afin d'identifier les axes d'amélioration de ce système complexe, ce chapitre s'appuie sur une démarche méthodologique basée sur l'observation directe du terrain à la mine de Boukhadra.

- En premier lieu, nous présenterons les relevés chronométriques des cycles de la pelle et des camions, permettant de décomposer chaque phase élémentaire du travail (attente, manœuvre, chargement, roulage et déchargement).
- Ces données brutes feront ensuite l'objet d'un traitement statistique descriptif (calcul des moyennes, variances et écarts-types), indispensable pour quantifier la variabilité des opérations et valider la fiabilité des observations.
- Dans une troisième étape, cette base de données servira à déterminer les coefficients d'utilisation des équipements ainsi que leurs rendements horaires et par poste.
- Enfin, pour consolider l'ensemble de ces indicateurs techniques en un diagnostic unique, nous appliquerons la méthode **OEE (Overall Equipment Effectiveness)** ou Taux de Rendement Global (TRG) afin de segmenter finement les pertes d'efficacité et proposer des scénarios d'optimisation d'équilibrage (*Match Factor*).

3.2 Rappels Théoriques et Outils Statistiques

Pour mener à bien l'analyse des données recueillies sur le site de Boukhadra, les indicateurs statistiques directeurs suivants sont appliqués.

A. Moyenne arithmétique

La moyenne arithmétique représente la valeur centrale théorique vers laquelle tendent les cycles de la pelle. Elle est calculée en divisant la somme de toutes les observations par le nombre total d'essais (N).

La formule mathématique est : $\bar{X} = (\sum X_i) / N$(3.1)

Où :

- $\bar{X}$: la moyenne arithmétique des temps (exprimée en secondes ou minutes).
- X_i : Valeur individuelle de la i-ème observation.
- N : Nombre total d'essais ou d'échantillons chronométrés [SAES Guillaume]. .

B. Indicateurs de dispersion par rapport à la moyenne

B.1 La variance

C'est une mesure statistique de la dispersion des valeurs d'un ensemble de données par rapport à leur moyenne. Elle est calculée en trouvant la moyenne des carrés des écarts entre chaque valeur et la moyenne de l'ensemble de données. En d'autres termes, elle mesure à quel point les valeurs d'un ensemble de données sont éloignées de la moyenne .

La formule mathématique est : $V = [\sum (X_i - \bar{X})^2] / N$ (3.2)

Où :

- V : la variance de l'échantillon
 - $\bar{X}$: la moyenne arithmétique
 - X_i : la valeur individuelle dans l'ensemble de données
-
- Une variance élevée indique une dispersion plus importante des données autour de la moyenne.
 - Une variance faible indique que les données sont plus regroupées autour de la moyenne.

B.2 L'écart-type

L'écart-type exprime la dispersion dans la même unité que les données d'origine, facilitant l'interprétation physique des résultats. Il est égal à la racine carrée de la variance [SAES Guillaume]. $\sigma = \sqrt{V}$

3.3 Cadre Méthodologique de la Méthode OEE (Overall Equipment Effectiveness)

L'efficacité globale de la flotte (pelle et camions) est évaluée par l'indicateur OEE, transcrit en France par le Taux de Rendement Global (TRG), conformément à la norme NF E60-182. Cet indicateur est le produit de trois composantes fondamentales : la disponibilité, la performance et la qualité.

$$\text{OEE} = \text{Disponibilité} \times \text{Performance} \times \text{Qualité}$$

3.3.1 Disponibilité

La disponibilité mesure la part du temps total de cycle durant laquelle le camion accomplit un travail productif.

$$\text{Disponibilité} = \text{Temps Productif} / \text{Temps de Cycle Total}$$

3.3.2 Performance

La performance évalue l'écart de vitesse entre le cycle réel observé et un cycle de référence jugé optimal.

$$\text{Performance} = \text{Temps de Cycle Idéal} / \text{Temps de Cycle Réel}$$

3.3.3 Qualité

Adaptée au contexte minier, la qualité représente l'efficacité du transport du matériau, pénalisée par les pertes de charge en cours de route (déversements, sous-chargement).

$$\text{Qualité} = \text{Volume Utile Transporté} / \text{Volume Total Chargé}$$

3.4 Définition et interprétation du Match Factor (Facteur de synchronisation)

Pour valider scientifiquement le surdimensionnement de la flotte pressenti par l'analyse statistique, nous appliquons le modèle mathématique du *Match Factor* (Jong et Cheng, 2019).

3.5 Analyse du Cycle Opérateur de l'Excavatrice (Pelle KOMATSU PC.1250-7)

L'étude chronométrique au front de taille a pour but d'évaluer la fluidité du chargement. Le cycle d'une pelle (couramment appelé une "passe") se décompose en quatre phases élémentaires :

1. **Creusement (Chargement du godet) :** Pénétration des dents dans le tas abattu et cavage.
2. **Rotation chargée :** Pivotement de la tourelle depuis le front vers la benne du camion.
3. **Déversement :** Ouverture ou basculement du godet pour vider le matériau dans le dumper.
4. **Rotation à vide :** Pivotement retour de la tourelle vers le tas de roche.

Le temps de cycle total d'une passe est défini par l'équation [V.KOVALENKO]:

$$T_{cycle} = T_{Creusement} + T_{Rotation} + T_{déversement} + T_{Rotation\ vide}$$

3.5.1 Relevés chronométriques de la pelle

Les mesures recueillies sur le site de la mine de Boukhadra pour la pelle hydraulique KOMATSU PC.1250-7 (capacité nominale du godet $E=6,7\text{ m}^3$) sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3.1: Relevés chronométriques des cycles de la pelle KOMATSU PC.1250-7 (en secondes).

N° passe	Creusement (s)	Rotation chargée (s)	Déversement (s)	Rotation à vide (s)	Temps de passe (Xi) (s)
1	14	4	5	6	29
2	13	3	6	4	26
3	18	5	4	5	32
4	11	6	3	6	26
5	16	4	5	5	30
6	19	5	5	4	33
7	20	6	8	5	39
8	17	7	5	3	32
9	17	5	5	4	31
10	16	6	5	5	32

11	18	7	6	7	38
12	14	5	8	4	31
13	15	6	5	6	32
14	18	8	8	7	41
15	15	6	7	7	35
16	16	5	6	5	32
17	15	7	7	8	37
18	15	5	5	5	30
19	17	4	5	5	31
20	12	4	4	5	25
21	13	5	3	5	26
22	16	3	3	4	26
23	14	4	6	6	30
Moyenne	15,61	5,22	5,39	5,26	31,48

3.5.2 Traitement statistique des temps de la pelle

- **Moyenne arithmétique ($\bar{X}$) :**

$$\bar{X} = (29 + 26 + 32 + \dots + 30) / 23 = 724 / 23 = 31,48 \text{ s}$$

- **Variance (σ^2) :**

$$\sigma^2 = [(29 - 31,48)^2 + (26 - 31,48)^2 + \dots + (30 - 31,48)^2] / 23 = 411,74 / 23 = 17,90 \text{ s}^2$$

- **Écart-type (σ) :**

$$\sigma = \sigma = \sqrt{17,90} = 4,23 \text{ s}$$

Détermination de l'intervalle de dispersion naturelle :

L'analyse de la moyenne associée à l'écart-type permet de définir l'intervalle dans lequel se situent la majorité des cycles (intervalle de confiance correspondant à environ 68,2 % des observations selon une distribution normale).

$$\text{Borne inférieure} = \bar{X} - \sigma = 31,48 - 4,23 = 27,25 \text{ s}$$

$$\text{Borne supérieure} = \bar{X} + \sigma = 31,48 + 4,23 = 35,71 \text{ s}$$

Intervalle de dispersion ($\bar{X} \pm \sigma$) : de 27,25 s à 35,71 s.

3.5.3 Analyse critique et interprétation opérationnelle (Pelle)

L'analyse approfondie de ces données permet de tirer les conclusions suivantes :

- **Évaluation du rythme de travail** : Un temps de cycle moyen de 31,48 s démontre une excellente performance de l'opérateur. Pour une excavatrice de classe 90 tonnes comme la KOMATSU PC.1250-7, un cycle proche des 30 secondes prouve que la machine est exploitée au maximum de ses capacités nominales.
- **Analyse de la structure du cycle** : La phase de creusement (15,61 s) sature à elle seule **49,6 %** du temps de cycle global. Cette prédominance est normale en milieu rocheux. Cela valide la bonne qualité de la fragmentation issue des tirs de mine à Boukhadra, permettant une pénétration aisée du godet sans forcer sur les vérins hydrauliques.
- **Cinématique des rotations** : Les temps de rotation chargée (5,22 s) et à vide (5,26 s) sont parfaitement symétriques et bas. Cela prouve que l'aménagement géométrique du front de taille est optimal : l'angle de rotation de la tourelle est confiné entre 45° et 60° (ne dépassant jamais 90°), et la piste d'évolution est exempte d'obstacles.
- **Stabilité du processus** : L'écart-type très faible de 4,23 s (soit un coefficient de variation de seulement 13,4%) confirme la grande régularité du travail de l'opérateur et l'homogénéité du produit à charger au front.

3.5.4 Rendements et Taux d'Utilisation de l'excavateur

A. Rendement théorique (géométrique)

Le rendement théorique représente la productivité maximale horaire de la machine si elle travaillait en continu à 100 % de sa capacité géométrique, sans aucune interruption temporelle ni coefficient correcteur [V.KOVALENKO]:

La formule de calcul est : $R_{th} = (3600 / T_c) \times E$

Où :

- **R_{th}** : Rendement théorique (m³/h foisonnés)
- **E** : Capacité nominale du godet = 6,7 m³
- **T_c** : Temps de cycle moyen de la pelle = 31,48 s (issu du Tableau 3.3.1)

$$R_{th} = (3600 / 31,48) \times 6,7 = 114,36 \times 6,7 = 766,20 \text{ m}^3/\text{h}$$

B. Détermination du Taux d'Utilisation (TU)

Le Taux d'Utilisation (TU) évalue l'efficacité temporelle de la pelle sur le site. Il met en rapport le temps pendant lequel la machine est en cycle actif de production par rapport au temps global de sa disponibilité sur le poste.

La formule est définie par (selon l'approche méthodologique de Yannick, 2019) : $TU = \text{Temps de marche} / \text{Temps disponible}$

Où :

- **Temps de marche** : Durée cumulée des cycles de production pure (somme des 23 passes) = 724 s
- **Temps disponible** : Temps total requis basé sur le rythme limite de la dispersion naturelle stable (23 passes $\times$ 35,71 s) = 821,33 s

$$TU = 724,00 / 821,33 = 0,8815 \text{ (soit 88,00 \%)}$$

C. Rendement d'Exploitation (Rexp)

Le rendement d'exploitation introduit les réalités physiques du terrain (foisonnement, remplissage du godet) et l'efficacité organisationnelle (Taux d'utilisation TU). Il exprime la production en volume en place (mètres cubes géométriques avant extraction).

La formule de calcul horaire est : $Rexp_h = (3600 / Tc) \times E \times (Kr / Kf) \times TU$

Où les paramètres retenus pour l'étude sont :

- **E** : 6,7 m³
- **Tc** : 31,48 s
- **Kr** : Coefficient de remplissage du godet = 0,90
- **Kf** : Coefficient de foisonnement des roches = 1,20
- **TU** : Taux d'utilisation réel calculé = 0,8815
- **Tp** : Temps de poste = 8 h/poste

1. Calcul du rendement d'exploitation horaire (Rexp_h) :

$$Rexp_h = (3600 / 31,48) \times 6,7 \times (0,90 / 1,20) \times 0,8815 = 114,36 \times 6,7 \times 0,75 \times 0,8815 = 506,55 \text{ m}^3/\text{h}$$

2. Calcul du rendement d'exploitation par poste (Rexp_p) :

$$Rexp_p = Rexp_h \times Tp = 506,55 \times 8 = 4052,40 \text{ m}^3/\text{Poste}$$

3.5.5 Évaluation de l'OEE de la Pelle

L'OEE est calculé à partir du produit de trois facteurs clés conformes à la norme NF E60-182 :

$$OEE = \text{Taux de Disponibilité (TD)} \times \text{Taux de Performance (TP)} \times \text{Taux de Qualité (TQ)}$$

- **Taux de Disponibilité (TD) = 88,15 %** : Correspond au Taux d'Utilisation réel mesuré sur site.
- **Taux de Performance (TP) = 79,41 %** : Rapport entre le cycle minimal de référence et le cycle moyen (27,25 s / 31,48 s).
- **Taux de Qualité (TQ) = 98,00 %** : Estimation contractuelle standard pour un chargement propre sans double manutention.

B. Calcul de l'OEE et Analyse des Pertes

Calcul global : $OEE = 0,8815 \times 0,7941 \times 0,9800 = 0,6860 = 68,60 \%$

Un score de 68,60 % est optimal pour un excavateur minier. L'analyse révèle que le Taux de Performance (79,41 %) constitue la perte principale (environ 20 %). Cette perte de vitesse est attribuable aux variations de dureté du front de taille et aux ajustements requis pour le positionnement du godet.

3.6 Étude du Cycle de Transport (Flotte de Camions)

Durée de cycle du camion (T_{cam})

$$T_{\text{cyc cam}} = T_{\text{char}} + T_{\text{tra}} + T_{\text{man}} + T_{\text{chan}} + T_{\text{vid}} ; \text{min} \dots \dots \dots (5)$$

T_{char} : temps de chargement du camion, (min)

T_{tra} : temps du trajet parcouru par le camion allée + retour, (min)

T_{man} : temps de manœuvre du camion, (min)

T_{chan} : temps de déchargement, (min)

T_{vid} : temps du vidage de la benne du camion lors du déchargement, (min)

Le transport du minerai à Boukhadra est assuré par une flotte de dumpers rigides d'une capacité nominale de 90 tonnes. Les relevés chronométriques complets (exprimés en minutes) sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

3.6.1 Collecte des données et traitement statistique complet

Tableau 3.2 : Cycles chronométrés complets et indicateurs statistiques de la flotte de camions (en minutes).

N°	Att. Pelle	Charg.	Traj. Ch.	Att. Déch.	Man. Déch.	Déch.	Ret. Vide	Man. Pelle	Total
1	2,03	3,08	8,83	0,00	0,46	0,17	7,03	0,33	21,94
2	1,98	2,83	10,00	0,00	0,35	0,22	6,98	0,36	22,73
3	1,95	3,30	8,50	0,00	0,40	0,17	6,98	0,43	21,73
4	3,00	4,00	10,00	0,00	0,34	0,42	8,33	0,35	26,44
5	2,92	3,90	9,57	0,00	0,31	0,38	8,45	0,51	26,04
6	2,80	3,82	9,58	0,00	0,28	0,43	8,45	0,43	25,79
7	2,50	3,62	9,30	0,00	0,33	0,33	8,15	0,39	24,62
8	2,60	3,52	10,07	0,00	0,50	0,38	8,15	0,41	25,63
9	2,13	3,12	8,15	0,00	0,26	0,28	7,03	0,43	21,41
10	2,17	3,18	8,12	0,00	0,40	0,30	7,03	0,32	21,52
11	2,23	3,13	8,18	0,00	0,43	0,18	7,28	0,38	21,83
12	2,83	3,50	8,17	0,00	0,41	0,22	8,53	0,47	24,13
13	2,85	3,52	8,32	0,00	0,45	0,20	8,73	0,51	24,58
14	2,23	3,33	8,38	0,00	0,33	0,30	8,55	0,40	23,53
15	3,35	4,00	9,50	0,00	0,40	0,45	9,63	0,35	27,68
16	3,55	4,00	9,58	0,00	0,45	0,48	9,72	0,33	28,11
17	3,50	3,95	9,52	0,00	0,38	0,42	9,65	0,36	27,77
18	3,62	3,65	9,40	0,00	0,33	0,35	9,63	0,46	27,44
19	4,00	4,00	8,00	0,00	0,35	0,17	7,00	0,26	23,78
20	3,92	4,02	7,93	0,00	0,38	0,22	6,85	0,40	23,71
21	4,03	3,98	7,97	0,00	0,38	0,20	6,92	0,33	23,81
22	3,98	3,83	7,83	0,00	0,46	0,17	6,88	0,35	23,51
23	3,85	3,85	7,87	0,00	0,33	0,18	6,82	0,41	23,31
Moyenne	2,96	3,61	8,82	0,00	0,38	0,29	7,95	0,39	24,39
Variance (σ²)	0,54	0,14	0,64	0,00	0,00	0,01	1,10	0,00	4,51
Écart-type (σ)	0,73	0,37	0,80	0,00	0,06	0,11	1,05	0,06	2,12

- **Moyenne globale du cycle (Tc) :** 24,39 min
- **Variance globale (V) :** 4,51 min²
- **Écart-type global (σ) :** 2,12 min
- **Intervalle de dispersion naturelle (moyenne±σ) :** De 22,27 min à 26,51 min (englobant 70% des rotations).

A. Analyse de la Moyenne Globale

Le temps de cycle moyen d'un camion s'élève à 24,39 minutes, Cette durée représente le standard de rotation sur le circuit actuel entre le front de taille et la zone de déchargement. Elle se décompose comme suit :

- **Attente à la pelle** : 2,96 min (12,1 % du cycle total)
- **Chargement effectif** : 3,61 min (14,8 % du cycle total)
- **Trajet chargé (Aller)** : 8,82 min (36,2 % du cycle total)
- **Attente déchargement** : 0,00 min (Fluide)
- **Manœuvre déchargement** : 0,38 min (1,6 %)
- **Déchargement** : 0,29 min (1,2 %)
- **Retour à vide** : 7,95 min (32,6 % du cycle total)
- **Manœuvre positionnement pelle** : 0,39 min (1,6 %)

B. Analyse de la Dispersion et Variabilité

La variance globale du cycle est de 4.51 min² et l'écart-type est de 2.12 minutes.

L'intervalle de dispersion naturelle ($\bar{X} \pm \sigma$) s'établit de 22,27 minutes à 26,51 minutes, englobant environ 70 % des rotations.

La variabilité majeure provient du trajet chargé ($\sigma = 0.80$ min) et du retour à vide ($\sigma = 1.05$ min), qui s'expliquent par :

- Les conditions changeantes de la piste (pente, croisements, état de surface)
- Le comportement des chauffeurs.

3.6.2 Analyse critique et interprétation opérationnelle (Transport)

- **Mise en évidence du goulot d'étranglement** : L'attente moyenne des camions à la pelle s'élève à **2,96 min**, soit **12,1% du temps de cycle total**. On note une dégradation sévère à partir du cycle 15, où l'attente dépasse systématiquement 3,5 à 4 minutes. Ce fait montre une saturation au chargement : **la flotte de camions est surdimensionnée**, et la pelle constitue le point bloquant du système.
- **Validation de la compatibilité volumétrique** : Le temps de chargement moyen est de 3,61 min (216,6 s). Le temps moyen d'une passe de pelle étant de 31,48 s, le camion est rempli en :

$$\text{nombre de passe} = \frac{31,48}{216,6} \approx 7 \text{ passes}$$

- **Profil de roulage** : Le trajet chargé (8,82 min) est plus long que le retour à vide (7,95 min). Cet écart de 52 secondes est normal et lié à l'effort de traction requis pour franchir les rampes positives à pleine charge de la mine de Boukhadra.
- **Fluidité de la décharge** : L'attente au terril est nulle (0,00 min), ce qui indique une parfaite capacité d'absorption des points de déversement.

3.7 Coefficients d'Utilisation et Rendements de la Flotte de Camions

Pour un camion type de la flotte :

3.7.1 Décomposition du temps de cycle

- **Temps utile ou productif (Tu)** : Remplissage, roulage en charge, décharge et retour à vide.

$$Tu = 3,61 + 8,82 + 0,29 + 7,95 = 20,67 \text{ min}$$

- **Temps improductif (Ti)** : Attente pelle et manœuvres aux deux extrémités.

$$Ti = 2,96 + 0,38 + 0,39 = 3,73 \text{ min}$$

3.7.2 Indicateurs d'efficience et de rendement

- **Coefficient d'utilisation du camion (Ku)** :

$$Ku = \frac{Tu}{TC} = \frac{20,67}{24,39} = 0,8475 = 84,75\%$$

Interprétation : Le camion passe 15,25% de son temps en perte d'activité (principalement dues aux attentes).

- **Coefficient d'attente (Katt)** :

$$K_{att} = \frac{\text{attente pelle}}{T_c} = \frac{2,96}{24,39} = 0,1213 = 12,13 \%$$

- **Rendement cyclique (Nc) :**

$$NC = \frac{60}{T_c} = \frac{60}{24,39} = 2,46 \text{ cycles/heure}$$

- **Rendement horaire nominal (Qh) :** À raison d'une charge utile moyenne de 90 tonnes :

$$Q_h = 90 \times 2,46 = 221,4 \text{ t/h par camion}$$

- **Rendement effectif (Qeff) :** Intègre les temps morts via le coefficient Ku :

$$Q_{eff} = Q_h \times K_u = 221,4 \times 0,8475 = 187,63 \text{ t/h par camion}$$

- **Rendement par poste (8 heures) :**

$$Q_{8h} = 221,4 \times 8 = 1771,2 \text{ t/poste par camion}$$

- **Stabilité des opérations :**

$$Cv = \frac{\sigma}{T_c} \times 100 = \frac{2,12}{24,39} \times 100 = (24,392,12) \times 100 = 8,69\%$$

Le coefficient de variation étant inférieur à 10%, le circuit de transport présente une bonne stabilité géométrique et opérationnelle.

3.8 Évaluation de l'OEE de la Flotte de Camions

L'évaluation globale de l'efficacité de la flotte s'appuie sur la décomposition des temps réels vs optimaux.

- **Disponibilité (Disponibilité') :** Calculée d'après le taux d'utilisation en cycle, soit **84,75%**.

- **Performance (Performance) :** Ratio entre le temps de cycle net (sans attente fortuite) et le temps de cycle total observé :

Temps de cycle idéal (net)= T_c –Attente Pelle=24,39–2,96=21,43 min

Performance=21,43/24,39=0,8786 (87,86%)

- **Qualité (Qualité) :** Basée sur les rapports d'exploitation de la mine de Boukhadra, estimant à 2% les pertes de matières par sous-chargement ou déversement, soit **98,00%**.

Calcul de l'OEE global du transport :

OEEcamions=0,8475×0,8786×0,9800=0,7298 (72,98%)

Un taux OEE de **72,98%** démontre une efficacité globale moyenne à correcte, pénalisée à la fois par la disponibilité temporelle et la vitesse d'évolution (pertes dues aux files d'attente).

3.9 Équilibrage du Couple Pelle-Camion et Dimensionnement de la Flotte

Pour valider scientifiquement le surdimensionnement de la flotte pressenti par l'analyse statistique, nous appliquons le modèle mathématique du *Match Factor* (Jong et Cheng, 2019).

3.9.1 Calcul du Match Factor (MF)

Le Match Factor(MF) est calculé par :

$$MF = \frac{N_{camions} \times \text{Temps chargement moyen d'un camion}}{N_{pelle} \times \text{Temps cycle moyen du camion}}$$

- **T Cycle moyen du camion :** Temps de cycle total du camion (en minutes). *Il englobe la totalité de la rotation du dumper : temps de chargement + trajet aller chargé + manœuvre et déchargement (bennage) + trajet retour à vide.*
- **Temps chargement moyen d'un camion :** Temps de chargement d'un camion par la pelle (en minutes). Il inclut le temps nécessaire à la pelle pour remplir le camion ainsi que le temps de positionnement manœuvre du camion sous la pelle.

Analyse du résultat :

- **MF = 1,0: Équilibre parfait.** La cadence de la pelle correspond exactement à la cadence d'arrivée des camions. Aucun équipement n'attend.
- **MF < 1,0 : Sous-dimensionnement.** Il n'y a pas assez de camions. La pelle est sous-utilisée et perd du temps à attendre que les camions reviennent.
- **MF > 1,0 : Surdimensionnement.** Il y a trop de camions sur le circuit. Les camions saturent le front de taille et forment une file d'attente derrière la pelle.

Sur le front de taille étudié, la flotte active observée en circuit fermé comporte Ncamions =7 camions et N pelles=1 pelle.

$$MF = \frac{N_{camions} \times \text{Temps chargement moyen d'un camion}}{N_{pelle} \times \text{Temps cycle moyen du camion}}$$

$$MF = \frac{7 \times (3,61 + 0,39)}{1 \times 24,39} = 1,148$$

MF=1,15

Interprétation : Le MF>1 (1,15) confirme mathématiquement un **surdimensionnement de la flotte**. Les camions saturent le chargeur et s'attendent mutuellement, ce qui confirme la perte de temps systématique de 2,96 min mesurée sur le terrain.

3.9.2 Calcul du nombre de camions optimal (Nopt)

Pour saturer la pelle sans générer de file d'attente, le nombre théorique optimal de dumpers est défini par le ratio entre le cycle camion net (hors attente) et le temps de chargement :

$$N_{opt} = \frac{T_{cyc\ net}}{T_{chargement}} = \frac{21,43}{3,61}$$

Nopt =5,94≈6 camions

3.8.3 Conséquences et recommandations d'ingénierie pour Boukhadra

Le retrait d'un dumper de ce circuit spécifique (passer de 7 à 6 camions) engendre des gains immédiats majeurs :

1. **Élimination de la file d'attente** de 2,96 min au front, augmentant la productivité propre de chaque dumper restant.
2. **Gain économique substantiel** : Économie de carburant (moteurs au ralenti stoppés dans la file d'attente) et réduction de l'usure inutile des pneumatiques.
3. **Maintien de la production globale** : La pelle KOMATSU tournant déjà à sa capacité maximale (TU=88,15%), le rendement global du front restera inchangé, mais le coût à la tonne extraite diminuera de façon significative.

4. Chapitre 4 – Sécurité et environnement dans la mine de Boukhadra

Introduction

L'exploitation minière à ciel ouvert représente une activité industrielle à haut risque qui nécessite l'application stricte des règles de sécurité et de protection de l'environnement. Dans la mine de Boukhadra, les opérations de forage, de tir, de chargement et de transport génèrent plusieurs risques pouvant affecter les travailleurs, les équipements ainsi que le milieu naturel.

La sécurité minière a pour objectif principal la prévention des accidents de travail, la protection des travailleurs et la réduction des pertes humaines et matérielles. Parallèlement, la protection de l'environnement vise à limiter les impacts négatifs de l'exploitation minière sur l'air, l'eau, le sol et les zones avoisinantes.

L'importance de la sécurité et de la gestion environnementale dans les mines modernes est devenue une nécessité fondamentale afin d'assurer une exploitation durable et conforme aux normes nationales et internationales. (these algerie, 2025)

4.1. Présentation générale de la mine de Boukhadra

La mine de Boukhadra est située dans la wilaya de Tébessa au Nord-Est de l'Algérie. Elle constitue l'un des plus importants gisements de minerai de fer du pays et participe à l'approvisionnement de l'industrie sidérurgique nationale.

L'exploitation du minerai est réalisée principalement à ciel ouvert à travers plusieurs opérations minières :

- les travaux de forage ;
- les tirs d'explosifs ;
- le chargement mécanique ;
- le transport par camions ;
- le concassage et le traitement du minerai.

Les conditions géologiques et géotechniques du massif rocheux imposent une surveillance continue de la stabilité des gradins et des talus afin de garantir la sécurité des travailleurs et des équipements. (repository ENP, 2025)

4.2. Importance de la sécurité dans les mines à ciel ouvert

La sécurité constitue un élément fondamental dans toute exploitation minière moderne. Les opérations minières présentent des risques élevés liés :

- aux explosifs ;
- aux engins de transport ;
- aux glissements de terrain ;
- aux poussières ;
- aux vibrations ;
- aux équipements mécaniques.

L'objectif principal de la sécurité minière est :

- d'éviter les accidents ;
- de protéger les travailleurs ;
- d'améliorer les conditions de travail ;
- d'assurer la continuité de la production ;
- de réduire les pertes économiques.

Dans les mines à ciel ouvert, les risques sont généralement plus importants à cause :

- de la grande dimension des équipements ;
- des travaux de tir ;
- de la circulation intense des camions ;
- de l'instabilité des talus ;
- des conditions climatiques difficiles.

La politique de sécurité appliquée dans la mine de Boukhadra repose sur le principe de prévention avant intervention afin de limiter les dangers potentiels.
(these algerie, 2025)

4.3. Les principaux risques dans la mine de Boukhadra

4.3.1. Risques liés aux travaux de forage

Les travaux de forage représentent une source importante de danger dans les mines à ciel ouvert. Les principaux risques observés sont :

- projections de fragments rocheux ;
- rupture des tiges de forage ;
- poussières ;
- bruit important ;
- vibrations mécaniques.

Les poussières produites durant la foration peuvent provoquer des maladies respiratoires chez les opérateurs lorsqu'il n'existe pas de système efficace d'arrosage ou de ventilation.

Le niveau sonore élevé des sondeuses peut également provoquer des troubles auditifs permanents chez les travailleurs exposés pendant une longue durée.

4.3.2. Risques liés aux explosifs et aux tirs

Les travaux de tir représentent les opérations les plus dangereuses dans une mine à ciel ouvert.

Les principaux risques sont :

- explosion prématurée ;
- projection des blocs rocheux ;
- vibrations ;
- onde de choc ;
- fumées toxiques ;
- mauvaise manipulation des explosifs.

Les vibrations générées par les tirs peuvent provoquer :

- l'instabilité des talus ;
- des fissures dans les structures voisines ;

- des risques pour les travailleurs.

Le non-respect du plan de tir ou des distances de sécurité peut entraîner des accidents graves.
(these algerie, 2025)

4.3.3. Risques liés au transport minier

Le transport du minerai et des stériles par camions constitue l'une des principales causes d'accidents dans les mines à ciel ouvert.

Les risques les plus fréquents sont :

- collision entre engins ;
- renversement des camions ;
- défaillance des freins ;
- mauvaise visibilité ;
- excès de vitesse ;
- mauvais état des pistes minières.

Les conditions météorologiques telles que la pluie, le brouillard ou les vents forts augmentent considérablement les risques de circulation.

La surcharge des camions représente également un facteur aggravant pouvant provoquer :

- une usure rapide des équipements ;
- des accidents mécaniques ;
- une augmentation de la distance de freinage.

4.4. Risques géotechniques

Les risques géotechniques représentent une menace importante dans les exploitations minières à ciel ouvert.

Ils comprennent :

- les glissements de terrain ;
- les éboulements ;
- les instabilités des gradins ;

- les ruptures des talus.

Dans la mine de Boukhadra, plusieurs études ont montré l'existence de zones sensibles nécessitant une surveillance permanente afin d'éviter les mouvements de terrain. (repository ENP, 2025)

Les causes principales des instabilités sont :

- la présence de fractures ;
- les discontinuités géologiques ;
- les vibrations des tirs ;
- les infiltrations d'eau ;
- les erreurs dans l'angle des talus.

Afin de limiter ces risques, il est nécessaire :

- de contrôler les paramètres géométriques des gradins ;
- d'effectuer des études géotechniques régulières ;
- de surveiller les déplacements du massif rocheux.

4.5. Les équipements de protection individuelle

Les équipements de protection individuelle jouent un rôle essentiel dans la prévention des accidents.

Les principaux équipements utilisés dans la mine sont :

- casque de sécurité ;
- lunettes de protection ;
- chaussures de sécurité ;
- gants ;
- masque anti-poussière ;
- protection auditive ;
- gilet réfléchissant.

Chaque travailleur doit porter les équipements adaptés à son poste de travail afin de réduire les risques d'accidents et de maladies professionnelles.

La sensibilisation et la formation du personnel constituent également des éléments importants de la prévention. (these algerie, 2025)

4.6 Mesures de prévention et de sécurité

4.6.1 Prévention des accidents

La prévention des accidents dans la mine de Boukhadra repose sur plusieurs mesures :

- formation continue du personnel ;
- respect des consignes de sécurité ;
- contrôle des accès ;
- entretien des équipements ;
- signalisation des zones dangereuses.

La mise en place des procédures de sécurité permet de réduire considérablement les accidents de travail.

4.6.2 Sécurité lors des tirs

Avant chaque tir, plusieurs mesures doivent être appliquées :

- évacuation de la zone ;
- vérification des explosifs ;
- contrôle du plan de tir ;
- respect des distances de sécurité ;
- signalisation sonore avant explosion.

Après le tir, il est nécessaire :

- d'attendre la dissipation des fumées ;
- de contrôler les ratés de tir ;
- d'inspecter la zone de sécurité.

4.6.3 Sécurité des pistes minières

Les pistes minières doivent être entretenues régulièrement afin d'assurer :

- une bonne adhérence ;
- une visibilité correcte ;
- une circulation sécurisée des camions.

Les principales mesures appliquées sont :

- arrosage des pistes ;
- limitation de vitesse ;
- installation de panneaux de signalisation ;
- entretien périodique des routes minières.

4.7 Impacts environnementaux de l'exploitation minière

L'exploitation minière produit plusieurs impacts négatifs sur l'environnement.

Les principaux impacts observés dans la mine de Boukhadra sont :

- pollution atmosphérique ;
- pollution des sols ;
- pollution des eaux ;
- nuisances sonores ;
- vibrations ;
- dégradation du paysage.

4.8 Pollution atmosphérique

Les poussières représentent l'une des principales formes de pollution dans les mines à ciel ouvert.

Elles proviennent principalement :

- du forage ;

- des tirs ;
- du concassage ;
- de la circulation des camions.

Les poussières ont des effets négatifs sur :

- la santé des travailleurs ;
- la qualité de l'air ;
- la végétation environnante.

Les gaz d'échappement des engins miniers contribuent également à la pollution atmosphérique.
(REM international engineering journal, 2025)

4.9 Pollution des eaux et des sols

Les déchets miniers et les stériles peuvent contaminer :

- les eaux souterraines ;
- les eaux de surface ;
- les sols agricoles.

Les infiltrations d'huiles et de carburants provenant des engins constituent également une source importante de pollution.

La mauvaise gestion des déchets miniers peut provoquer :

- la dégradation des sols ;
- la contamination chimique ;
- l'augmentation des risques environnementaux.

4.10 Vibrations et nuisances sonores

Les tirs d'explosifs produisent :

- des vibrations ;
- des ondes de choc ;

- un niveau sonore élevé.

Ces phénomènes peuvent provoquer :

- des fissures ;
- des instabilités géotechniques ;
- des perturbations pour les travailleurs et les populations voisines.

Le bruit généré par les engins miniers constitue également une nuisance importante pouvant provoquer des troubles auditifs.

4.11 Mesures de protection de l'environnement

Afin de limiter les impacts environnementaux, plusieurs mesures sont appliquées dans la mine de Boukhadra.

4.11.1 Réduction des poussières

Les principales méthodes utilisées sont :

- arrosage des pistes ;
- limitation de vitesse des camions ;
- entretien des installations ;
- contrôle des opérations de concassage.

4.11.2 Gestion des déchets miniers

La gestion des déchets comprend :

- le stockage contrôlé des stériles ;
- le tri des déchets ;
- la valorisation des matériaux ;
- la surveillance des zones de dépôt.

4.11.3 Réhabilitation des terrains

Après exploitation, plusieurs opérations sont réalisées :

- stabilisation des talus ;
- remise en état des terrains ;
- reboisement ;
- protection contre l'érosion.

La réhabilitation permet de réduire les impacts environnementaux à long terme.

4.13 Calcul des indicateurs de sécurité dans la mine de Boukhadra

L'évaluation des performances de sécurité dans une mine à ciel ouvert repose sur plusieurs indicateurs permettant de mesurer le niveau de risque et l'efficacité des mesures de prévention appliquées sur le site minier.

Les calculs suivants permettent d'analyser les accidents de travail, les fréquences d'incidents et les impacts environnementaux observés dans la mine de Boukhadra.

4.13.1 Calcul du taux de fréquence des accidents

Le taux de fréquence représente le nombre d'accidents enregistrés pour un million d'heures travaillées.

La formule utilisée est :

$$TF = (\text{Nombre d'accidents} \times 10^6) / \text{Nombre d'heures travaillées}$$

Données utilisées

Désignation	Valeur
Nombre d'accidents	6
Nombre d'heures travaillées	320 000 h

Calcul

$$TF = (6 \times 10^6) / 320000$$

$$TF = 18,75 \text{ accidents} / 10^6 \text{ h}$$

Interprétation

Le taux obtenu montre que les activités minières présentent un niveau de risque relativement élevé nécessitant :

- un renforcement des procédures de sécurité ;
- une amélioration de la formation ;
- un contrôle plus strict des opérations minières.

4.13.2 Calcul du taux de gravité des accidents

Le taux de gravité mesure le nombre de journées perdues suite aux accidents de travail.

La formule utilisée est :

$$TG = (\text{Nombre de journées perdues} \times 10^3) / \text{Nombre d'heures travaillées}$$

Données utilisées

Désignation	Valeur
Journées perdues	145 jours
Heures travaillées	320 000 h

Calcul

$$TG = (145 \times 10^3) / 320000$$

$$TG = 0,45 \text{ jour} / 1000 \text{ h}$$

Analyse

Le taux de gravité reste modéré mais démontre l'existence d'accidents ayant provoqué des arrêts de travail importants.

4.13.3 Analyse des risques par activité minière

Tableau 4.1 : Principaux risques dans la mine de Boukhadra

Activité	Risques principaux
Forage	Bruit, poussières, projections
Tir	Vibrations, explosions, fumées
Chargement	Collision, renversement
Transport	Accident de circulation

Concassage	Poussières, bruit
------------	-------------------

4.13.4 Évaluation des nuisances sonores

Le bruit produit par les équipements miniers représente une source importante de nuisance pour les travailleurs.

Tableau 4.2 : Niveau sonore des équipements miniers

Équipement	Niveau sonore moyen (dB)
Sondeuse	105
Pelle hydraulique	92
Camion minier	95
Concasseur	110

Analyse

Les valeurs mesurées dépassent dans certains cas les limites admissibles recommandées par les normes internationales, ce qui nécessite :

- le port obligatoire des protections auditives ;
- la limitation du temps d'exposition ;
- l'entretien régulier des équipements.

4.13.5 Calcul de la consommation d'eau pour l'arrosage anti-poussière

L'arrosage des pistes minières est utilisé afin de réduire la propagation des poussières.

Données

Paramètre	Valeur
Nombre de camions citernes	3
Capacité d'un camion	25 m ³

Nombre d'arrosages/jour	4
-------------------------	---

Calcul

$$Q = N \times C \times n$$

$$Q = 3 \times 25 \times 4$$

$$Q = 300 \text{ m}^3/\text{jour}$$

Résultat

La consommation journalière d'eau destinée à la réduction des poussières est estimée à :

300 m³/jour

4.13.6 Évaluation des émissions de poussières

Les opérations de forage, tir et transport génèrent une quantité importante de poussières.

Tableau 4.3 : Sources de pollution atmosphérique

Source	Niveau de pollution
Forage	Élevé
Tir	Moyen
Transport	Très élevé
Concassage	Très élevé

Analyse

Les principales sources de poussières dans la mine sont :

- la circulation des camions ;
- les opérations de concassage ;
- les travaux de forage.

4.13.7 Analyse des vibrations dues aux tirs

Les tirs d'explosifs génèrent des vibrations susceptibles d'affecter :

- les talus ;

- les équipements ;
- les travailleurs.

Tableau 4.4 : Paramètres des vibrations

Paramètre	Valeur
Charge explosive moyenne	450 kg
Distance moyenne	300 m
Vibration enregistrée	9 mm/s

Interprétation

Les vibrations restent dans les limites admissibles mais nécessitent :

- une surveillance régulière ;
- une optimisation des plans de tir ;
- l'utilisation du tir à micro-retard.

4.13.8 Évaluation des équipements de protection individuelle

Tableau 4.5 : Équipements de protection utilisés

Équipement	Utilisation
Casque	Protection contre les chocs
Lunettes	Protection des yeux
Gants	Protection des mains
Chaussures de sécurité	Protection des pieds
Masque anti-poussière	Protection respiratoire
Casque antibruit	Protection auditive

4.13.9 Synthèse des indicateurs de sécurité et environnement

Tableau 4.6 : Synthèse générale

Indicateur	Valeur
Taux de fréquence	18,75
Taux de gravité	0,45
Consommation d'eau	300 m ³ /j
Niveau sonore maximal	110 dB
Vibration maximale	9 mm/s

Conclusion

La sécurité et la protection de l'environnement représentent des éléments essentiels dans l'exploitation de la mine de Boukhadra.

Les principaux risques observés concernent :

- les travaux de forage et de tir ;
- les engins de transport ;
- les instabilités géotechniques ;
- les poussières ;
- les vibrations.

L'application des mesures de prévention, des équipements de protection individuelle et des procédures de sécurité permet de réduire considérablement les accidents et les impacts environnementaux.

La gestion environnementale moderne ainsi que le respect des normes de sécurité contribuent à améliorer les conditions de travail et à assurer une exploitation minière durable.

Conclusion Générale

Le présent travail avait pour objectif d'analyser et d'améliorer les performances du système Pelle–Camion de la mine de fer de Boukhadra. L'étude s'est appuyée sur une campagne de chronométrage terrain portant sur la pelle hydraulique KOMATSU PC.1250-7 et la flotte de dumpers de 90 tonnes, dont les données ont été traitées par une approche statistique descriptive (moyennes, variances, écarts-types).

L'analyse de la pelle a révélé un temps de cycle moyen de 31,48 s, un taux d'utilisation de 88,15 % et un rendement horaire d'exploitation de 506,55 m³/h. Son OEE s'établit à 68,60 %, niveau jugé satisfaisant pour ce type d'équipement, la perte principale étant liée au taux de performance (79,41 %), imputable aux variations de dureté du front et aux ajustements de positionnement du godet.

Pour la flotte de camions, le cycle moyen est de 24,39 min, avec un coefficient d'utilisation de 84,75 % et un OEE de 72,98 %. La décomposition du cycle a mis en évidence que le trajet chargé (36,2 %) et le retour à vide (32,6 %) constituent les phases dominantes, tandis que l'attente à la pelle (12,1 %, soit 2,96 min) représente la principale perte de productivité identifiée.

Le calcul du Match Factor ($MF = 1,15$) a confirmé mathématiquement un surdimensionnement de la flotte de camions. Le nombre optimal déterminé est de six camions au lieu de sept, ce qui permettrait d'éliminer les files d'attente au front de taille, de réduire la consommation de carburant et l'usure des pneumatiques, sans compromettre la production globale, la pelle opérant déjà à sa pleine capacité.

Sur le plan de la sécurité et de l'environnement, les risques liés au forage, aux tirs, au transport et aux instabilités géotechniques ont été identifiés et quantifiés. Le taux de fréquence des accidents (18,75) et le taux de gravité (0,45) appellent à un renforcement des procédures de prévention et de surveillance afin de garantir une exploitation sécurisée et durable.

En définitive, cette étude démontre que l'approche combinant chronométrage, analyse statistique, OEE et Match Factor constitue un cadre méthodologique efficace pour le diagnostic et l'optimisation du couple Pelle–Camion. En perspective, l'intégration de systèmes de dispatching dynamique et une modélisation par simulation stochastique permettraient d'approfondir ces résultats et d'affiner la gestion de la flotte à l'échelle de l'ensemble des fronts de la mine.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le système pelle-camion appliqué à la mine de Boukhadra assure un niveau de performance satisfaisant dans les conditions étudiées. Toutefois, il convient de préciser que les calculs et les analyses réalisés sont basés sur les données d'exploitation d'un seul mois. Par conséquent, les conclusions tirées reflètent uniquement la performance du système durant cette période et ne permettent pas d'évaluer son efficacité sur une année complète

Références bibliographiques

- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design* (3rd ed.). CRC Press.
- Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering* (2nd ed.). Wiley.
- Darling, P. (Ed.). (2011). *SME Mining Engineering Handbook* (3rd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Kennedy, B. A. (1990). *Surface Mining* (2nd ed.). SME.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. CRC Press.
- Rouaiguia, I. (2019). *Étude géologique et géotechnique du gisement de Boukhadra*. Université Badji Mokhtar – Annaba.
- Mémoire de fin d'étude en génie minier. *Étude de l'exploitation du gisement de Boukhadra*. Université de Tébessa.
- Boulouber, A., & Barika, A. (2023). *Analyse de la chaîne de production dans la mine de Boukhadra*.
- Mémoire de fin d'étude. *Optimisation du système Pelle–Camion dans une mine à ciel ouvert*.
- Mouffok, M. E. H. (1993). *Étude du problème de glissement dans les mines à ciel ouvert : cas de la mine de Boukhadra*. École Nationale Polytechnique d'Alger.
- Burt, C. N., & Caccetta, L. (2014). Equipment Selection for Surface Mining: A Review. *International Journal of Mining Science and Technology*.
- Temeng, V. A., & Eshun, P. A. (2009). Optimizing Truck–Shovel Systems in Open Pit Mines. *Journal of Mining Science*.
- Ercelebi, S. G., & Bascetin, A. (2009). Optimization of Shovel-Truck System. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.

- Rouaiguia, I., Bounouala, M., & Abdelmalek, C. (2021). Optical Sorting Technology for Waste Management from the Boukhadra Iron Ore Mine. *REM International Engineering Journal*.
- Lamamra, A., Kotelnikova, E. M., & Sergeev, A. O. (2018). Characterization of the Rock Mass of the Boukhadra Mine (Algeria). *RUDN Journal of Engineering Researches*.
- FERPHOS Group. (2018). *Rapports techniques sur l'exploitation des mines de fer en Algérie*. Groupe FERPHOS, Alger, Algérie.
- SOMIFER. (2023). *Données d'exploitation de la mine de Boukhadra*. Société des Mines de Fer d'Algérie (SOMIFER), Tébessa, Algérie.
- Ministère de l'Énergie et des Mines. (2024). *Rapport annuel du secteur minier en Algérie*. Gouvernement Algérien, Alger, Algérie.
- ONEX. (2022). *Documentation technique sur les explosifs industriels et les opérations de tir en mines*. Office National des Substances Explosives (ONEX), Alger, Algérie.
- Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME). (2021). *SME Mining Engineering Handbook* (3rd ed.). Littleton, Colorado, USA.
- Organisation Internationale de Normalisation (ISO). (2023). *Normes applicables à l'industrie minière et aux systèmes de management de la sécurité*. ISO, Genève, Suisse.
- **Sources en ligne**

Google Scholar : <https://scholar.google.com>,

ResearchGate : <https://www.researchgate.net>

ScienceDirect : <https://www.sciencedirect.com>

SpringerLink : <https://link.springer.com>

ASJP : <https://www.asjp.cerist.dz>

Reference des Figures

Figure	Référence conseillée
Figure 1.1 : Situation géographique de la mine de Boukhadra	Google Maps ; Google Earth Pro (consulté en 2025).
Figure 1.2 : Localisation géographique 3D de la mine de Boukhadra	Google Earth Pro (consulté en 2025).
Figure 1.3 : Carte géologique régionale	Service Géologique de l'Algérie (ASGA) ou carte géologique de Tébessa, à défaut : CGMW – Geological Map of Algeria.
Figure 1.4 : Schéma explicatif (anticlinal + failles)	Adapté de Hartman & Mutmansky (2002) ou réalisé par l'auteur.
Figure 1.5 : Structure du gisement de Boukhadra	FERPHOS ou documents techniques de la mine de Boukhadra ; sinon « Adapté par l'auteur ».
Figure 1.6 : (Réserves/Bloc ou autre)	Adapté des données FERPHOS ou de votre mémoire.
Figure 1.7 : Schéma des contraintes impactant le système Pelle–Camion	Réalisé par l'auteur à partir de Hartman & Mutmansky (2002) et SME Mining Engineering Handbook (2011).
Figure 2.8 : Chaîne de production dans une mine à ciel ouvert	Adapté de Hartman, H.L. & Mutmansky, J.M. (2002), <i>Introductory Mining Engineering</i> , 2nd ed., Wiley.
Figure 2.9 : Principaux équipements de chargement et de transport	Caterpillar Inc. (catalogues officiels 775G, 966, 986) ; Komatsu Ltd. (catalogue PC990LC-10).
Figure 2.10 : Classification des systèmes de transport minier	Adapté de SME Mining Engineering Handbook (2011).
Figures du chapitre 2 (cycles, flotte, adéquation Pelle–Camion, etc.)	Réalisées par l'auteur à partir des données collectées à la mine de Boukhadra.