



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 : Electromécanique minière

Étude D'application de la Nouvelle Technologie Rail-Veyor dans La Mine de Blad El Hadba

Par : Aissoug Ouail

Devant le jury :

Louafi Messaoud	Président	Pr	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Rechach Abdelkrim	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Fares Noureddine	Examineur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026

Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le : 08/06/2026

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants : **Aissoug Ouail**

Niveau : 2^{ème} Année Master Option : Electromécanique minière

Thème : Étude D'application de la Nouvelle Technologie Rail-Veyor dans La Mine de Bled El Hadba

Nom et prénom de l'encadreur : Abdelkrim Rechach

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
CHAP I : Aperçu géologique et minier de la mine de phosphate de Bled El Hadba	
CHAP II : Le transport dans la mine de Bled El Hadba (Convoyeur à bande)	
CHAP III : La Technologie Rail-Veyor	
CHAP IV : Comparaison entre le Rail-Veyor et le convoyeur à bande dans la mine de Bled El Hadba	
Conclusion générale	

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) عيسوق وائل الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 413283999 و الصادرة بتاريخ 2024.11.04

المسجل بمعهد المناجم قسم المناجم والجيوتكنولوجيا

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

Étude D'application de la Nouvelle
Technologie Rail-Vegordans la Mine de Bled
EL Had Ba

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

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 06 جوان 2025



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالَ تَعَالَى: ﴿قُلْ هَلْ يَسْتَوِي
الَّذِينَ يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ﴾

(الزمر: 9/39)



Remerciements

Ce mémoire marque la fin d'un parcours, mais aussi l'aboutissement de plusieurs mois de travail, d'efforts, de doutes parfois et de belles découvertes. À ce titre, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont, chacune à leur manière, contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

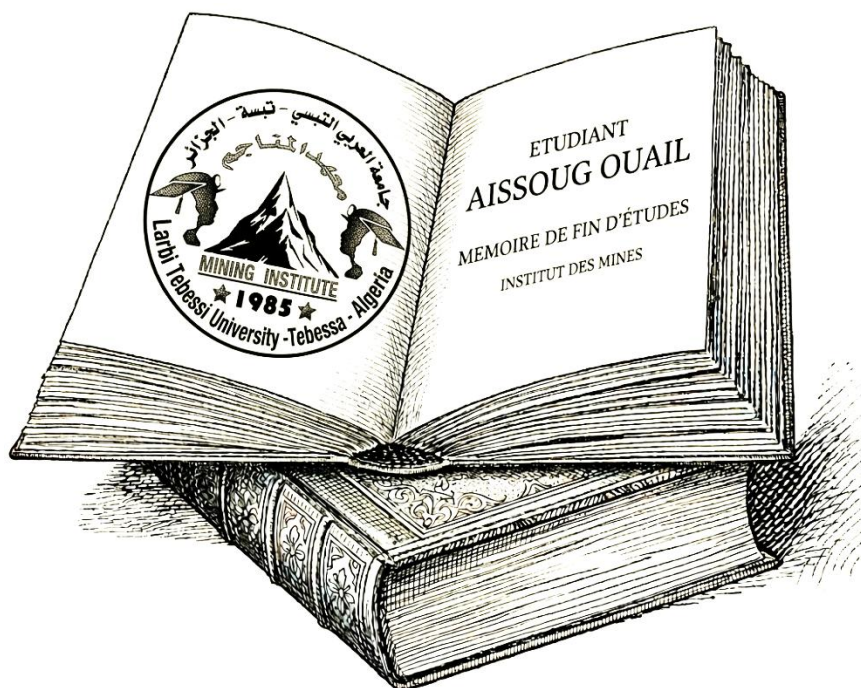
Avant tout, je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, **M. Rechach Abdelkrim**, pour son encadrement bienveillant, sa patience, ses conseils éclairés, et surtout pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de ce travail. Ses remarques pertinentes et son accompagnement m'ont permis de progresser et de structurer mes idées avec clarté.

Je remercie également tous les enseignants et intervenants rencontrés durant mon cursus pour la richesse de leur enseignement et leur engagement. J'adresse mes remerciements particuliers aux enseignants de l'institut des mines qui Grâce au bon dieu et à eux, on a pu élargir nos connaissances et forger un esprit critique.

Merci à l'**Institut des Mines de Tébessa**, et particulièrement au **Département de Génie Minier** pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail, ainsi qu'aux personnes rencontrées, pour leur accueil chaleureux et leur aide précieuse.

Je ne pourrais oublier de remercier **mes amis**, qui ont su m'écouter, me motiver et me faire rire même pendant les périodes les plus chargées. Merci pour votre présence, vos messages à point nommé, vos relectures et surtout votre amitié.

Enfin, un merci du fond du cœur à **ma famille**, véritable pilier tout au long de mon parcours. Merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements constants, et votre confiance en mes capacités. Sans vous, rien n'aurait été possible.



Dédicace



Alhamdoulillah, qui m'a accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires pour accomplir ce travail

À mes Parents,

Ma source d'amour, de soutien et de motivation.

Merci pour vos prières, vos encouragements, vos sacrifices et votre présence inestimable.

Cette réussite vous est vous est dédiée.

À mes chers frère « Fahd, Ashraf, Abdenour »

Qui ont toujours été pour moi un véritable soutien, une source constante d'encouragement et de force, J'adresse ce modeste travail en témoignage de ma profonde gratitude et en reconnaissance de leur précieux appui.

À celle qui est chère à mon cœur 'S',

Compagne de mon chemin et partenaire de ma vie, qui m'a soutenu dans toutes les épreuves de l'existence et continue de le faire, j'offre ce modeste travail, en priant Dieu de faciliter notre vie et de nous combler de bonheur.

À mes enseignants et encadreurs,

Je vous remercie sincèrement pour votre disponibilité, vos conseils avisés et votre accompagnement tout au long de ce mémoire.

À ma famille, avec amour et gratitude.

À mes chers amis, « Imad, Roudouan, Riad, Sohaibe, Aala, Aissa, Aymen , Iheb ... »

Qui ont été pour moi des compagnons fidèles sur le chemin de l'amitié, et qui ont toujours été une source de soutien, d'encouragement et d'appui, j'offre ce modeste travail en témoignage de ma profonde gratitude et en reconnaissance de la sincérité de leur affection.

Enfin, à ceux qui m'ont encouragé quand la fatigue et le découragement pesaient sur moi, merci du fond du cœur.



Sommaire

Résumé.....	IX
Summary.....	XI
Introduction Générale.....	1
<u>CHAPITRE I : Aperçu géologique et minier de la mine de phosphate de Bled El Hadba</u>	
I.1 Introduction.....	4
I.2. Géologie régionale de Bir El Ater	4
I.3. Présentation du secteur minier de Bir-El-Ater.....	4
I.3.1. Situation géographique	4
I.3.2. Litho stratigraphie de la région de Bir El Ater.....	6
I.3.3. Tectonique	10
I.4. Géologie locale du gisement de phosphate de Bled El Hadba	12
I.4.1. Situation géographique	12
I.4.2. Contexte géologique du gisement de Bled El Hadba	13
I.4.3. Lithostratigraphie.....	15
I.5. Aperçu hydrologique.....	18
I.5.1 La climatologie.....	19
I.5.2. Température	19
I.5.3. Pluviométrie	20
I.5.4. Le vent	20
I.6. Conclusion.....	28
<u>CHAPITRE II : Le transport dans la mine de Bled El Hadba (Convoyeur à bande)</u>	
II.1 Introduction.....	29
II.2 Systèmes de transport interne dans la mine de Bled El Hadba :.....	22
II.3. Convoyeur à bande	23
II.3.1. Définition d'un convoyeur.....	23
II.3.3. Avantages et inconvénients du convoyeur à bande.....	25
□ Avantages.....	25
□ Inconvénient	26
II.3.4. Types et configurations des convoyeurs à bande	26
II.4. Caractéristiques techniques des convoyeurs à bande.....	28
II.5. Composants du convoyeur et leurs dénominations.....	30
II.5.1. Tambour	30
II.5.2. Garnitures de tambours	30
Remarque technique.....	31
Exemple de vérification simple de dimensionnement pour Bled El Hadba.....	31
II.5.3. Emplacement des tambours	32
II.5.4. Tambour de commande (tête motrice ou d'entraînement)	33

II.5.5. Tambour de renvoi	33
II.5.6. Tambour de contrainte.....	33
II.7. Différents types d'entraînement des convoyeurs à bande	33
7.1 Tambour motorisé.....	34
7.2 Intérêt pour Bled El Hadba.....	35
II.8. Dispositifs de tension.....	35
II.9. Trémie d'alimentation	36
II.10. Dispositifs de nettoyage	37
II.11. Capot ou couvercle protecteur.....	38
II.12. Bande (courroie).....	39
II.12.1. Caractéristiques et rôle de la bande transporteuse.....	42
II.12.2. Composition et rôle	42
II.12.3. Principe de fonctionnement	42
II.12.4. Caractéristiques principales	42
□ Relation de base.....	43
II.13. Stations porteuses en auge.....	43
□ Stations supports inférieures.....	44
II.14. Stations de transfert intermédiaires	45
II.14.1. Rôle dans la mine de Bled El Hadba	45
II.14.2. Fonctionnement et besoins	45
II.14.3. Entretien	45
II.15. Conclusion	46

CHAPITRE III : La Technologie Rail-Veyor

III.1. Introduction	49
III.2. Développement historique	50
III.3. Déploiement mondial	50
III.4. Système Rail-Veyor — Matériel.....	51
III.4.1. Wagons	51
III.4.2. Stations d'entraînement	53
III.4.3. Voie et traverses.....	54
III.4.4. Configurations de train.....	56
III.4.5. Lignes directrices géométriques (courbure et pente).....	57
III.5. Système Rail-Veyor — Automatisation.....	58
III.6. Options de chargement	59
III.7. Options périphériques — Déchargement.....	60
III.8. Rayon de courbure et contraintes géométriques	62
III.9. Maintenance.....	64
III.10. Utilisation en développement	68
III.11. Propreté — Performance environnementale	70
III.13. Rentabilité — Performance énergétique et économique.....	72
III.14. Avantage concurrentiel — Comparaison synthétique	73

III.15. Lignes directrices d'application	74
III.16. Proposition budgétaire.....	74
III.17. Processus d'achat.....	75
III.18. Synthèse et transition vers l'application à Bled El Hadba.....	75
III. 19. Conclusion.....	76

CHAPITRE IV : Comparaison entre le Rail-Veyor et le convoyeur à bande dans la mine de Bled El Hadba

IV.1.Introduction.....	78
IV.2. Système Rail-Veyor	79
IV.2.1. Avantages environnementaux	79
IV.2.1.1. Réduction de l’empreinte carbone	79
IV.2.1.2. Absence d’émissions particulières directes	79
IV.2.1.3. Réduction du bruit et des poussières	80
IV.2.1.4. Conditions d’exploitation favorables	80
IV.3. Exploitation, maintenance et sécurité du Rail-Veyor.....	80
IV.3.1. Maintenance simplifiée.....	80
IV.3.2. Sécurité d’exploitation	80
IV.3.3. Propreté et autonomie	81
IV.3.4. Flexibilité d’exploitation	81
IV.4. Système de convoyeur à bande	81
IV.4.1. Limites techniques	81
IV.4.2. Contraintes de maintenance	81
IV.4.3. Entretien et réparation.....	82
IV.4.4. Nettoyage et exploitation courante.....	82
IV.5. Comparaison entre les deux systèmes.....	82
IV.6. Conclusion.....	82
Conclusion générale	92

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Carte de situation géographique de la région de Bir-El-Ater.
Figure I.2	Carte de situation géographique et géologique des gisements de Bir-El-Ater. (Priant Cortiel, 1993)
Figure I.3	Colonne litho-stratigraphique de la région de Bir-El-Ater 3 Algérie Orientale-(D'après Cielenskyet al, 1988).
Figure I.4	Carte structurale de la région du Bir-El-Ater à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métlaoui-Djebel Onk (Aissaoui, 1984).
Figure I.5	Carte de situation géographique de gisement de Bled El Hadba.
Figure I.6	Carte géologique du gisement de Bled El Hadba.
Figure I.7	Litho-stratigraphie du gisement de Bled El Hadba (CielenskyetBenchernine, 1987).
Figure I.8	Coupe géologique représentent le prolongement des couches phosphatées du gisement de Bled El Hadba.
Figure I.9	Réseau d'écoulement des eaux de surface.
Figure II.1	Convoyeur a bande.
Figure II.2	Les différents composants du convoyeur à bande.
Figure II.3	Les composants de la bande transporteuse
Figure II.4	Type et configuration des convoyeurs à bande.
Figure II.5	Schéma de principe d'un convoyeur à bande
Figure II.6	types de garnitures de tambour.
Figure II.7	Emplacement des tambours.
Figure II.8	Tête d'entraînement classique.
Figure II.9	Tambour motorisé.
Figure II.10	types de dispositifs de tension
Figure II.11	Vues de trémie de chargement.
Figure II.12	Dispositifs de nettoyage.
Figure II.13	Couvercle de protection.
Figure II.14	types de supports de bande.
Figure II.15	Convoyeur à bande horizontale.
Figure II.16	Convoyeur à tronçons horizontal et incliné, pour lequel il est nécessaire d'utiliser deux bandes
Figure II.17	Convoyeur à bande horizontale et tronçon incliné, où l'espace permet une courbe verticale et la charge ne nécessite qu'une seule bande

Figure II.18	Convoyeur à bande horizontale et tronçon incliné, où l'espace permet une courbe verticale et la charge ne nécessite qu'une seule bande
Figure II.19	Convoyeur à bande inclinée et tronçon horizontal, où la charge ne nécessite qu'une seule bande et l'espace permet une courbe verticale
Figure II.20	Convoyeur à une seule bande comportant un tronçon horizontal, un tronçon incliné et un en descente avec des Courbes verticales
Figure II.21	Convoyeur à tronçons horizontal et incliné, où l'espace ne permet pas de courbe verticale et la charge nécessite deux bandes
Figure II.22	Convoyeur dont la bande est chargée en pente ascendante ou descendante
Figure II.23	Caractéristiques et rôle de la bande transporteuse en mine
Figure II.24	Fixation des rouleaux sur la station-support
Figure II.25	Rouleaux porteurs inférieurs
Figure II.26	Stations de transfert intermédiaires
Figure III.1	Machine de Rail-Veyor
Figure III.2	Aperçu global de l'utilisation du Rail-Veyor
Figure III.3	Wagon de Rail-Veyor Standard 30" (.765m)
Figure III.4	Stations d'entraînement
Figure III.5	Détails de conception de la voie Rail-Veyor, assemblages et géométrie.
Figure III.6	Comparaison des exigences de fondation et de structure entre le Rail-Veyor et le rail lourd classique.
Figure III.7	Lignes directrices Géométriques du système Rail-Veyor
Figure III.8	Système de contrôle de commande et de supervision centralisée
Figure III.9	Conception isométrique et installation opérationnelle d'une station de chargement Rail-Veyor
Figure III.10	Aperçu des processus de stockage, incluant le chargement par camion, la boucle de déchargement mobile et les méthodes de reclaimage.
Figure III.11	Spécifications géométriques du Rail-Veyor : encombrement de la boucle et rayons de courbure minimaux.
Figure III.12	opérations de maintenance et inspection technique d'une unité de propulsion Rail-Veyor en environnement souterrain.
Figure III.13	vu de gauche et vu de dessus de Rail Veyor
Figure III.14	Vues de face et de côté du système Rail-Veyor
Figure III.15	Convoyeur à bande horizontale.
Figure III.16	Vu de gouache de déchargement de Rail Veyeur
Figure III.17	Coupe longitudinale du chariot
Figure III.18	Modèle d'intégration du système Rail-Veyor dans une exploitation minière souterraine, illustrant les capacités de pente et le transport continu.
Figure III.19	Risque d'incendie majeur et vulnérabilité structurelle d'une bande transporteuse conventionnelle.
Figure III.20	Comparaison de l'efficacité énergétique et des coûts d'opération entre le système Rail-Veyor, les convoyeurs et les camions.

Figure IV.1	Représentation graphique de répartition les nombre des pannes pour l'année
-------------	--

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1	Jalons industriels du système rail-veyor 1999-2021
Tableau III.2	Configuration de voie rail-veyor
Tableau III.3	Rayons de courbure minimaux
Tableau III.4	Economies d'émissions et de carburant obtenues par le rail-veyor par rapport à un parc de camions diesel équivalent (référence fabricant)
Tableau III.5	Performance comparative énergétique et économique (rail-veyor vs convoyeur vs camion)
Tableau III.6	Synthèse des avantages concurrentiels (données fabricant)
Tableau III.7	Etapes d'estimation des coûts
Tableau IV.1	La différence entre la technologie moderne rail-veyor et le camion et le convoyeur à bande
Tableau IV.2	Comparaison technique entre le rail-veyor et le convoyeur a bande

Résumé :

Ce travail vise à traiter la problématique du maintien de l'efficacité des systèmes de transport minier dans le gisement de **Blad El Hadba** sur le long terme, en recherchant des solutions rationnelles permettant d'optimiser le schéma de transport du minerai et d'évoluer d'un mode de transport conventionnel vers des alternatives plus modernes et mieux adaptées aux spécificités du projet. Cette orientation s'inscrit dans une démarche d'adoption d'une technologie avancée, appuyée par un système automatisé, tout en tenant compte des exigences de protection de l'environnement, de réduction de la consommation d'énergie, d'amélioration de la productivité et de limitation des pannes, lesquelles affectent négativement la continuité de la production et la compétitivité économique.

Dans ce contexte, la technologie **Rail-Veyor** s'est imposée comme l'une des solutions les plus prometteuses dans le domaine du transport minier, en raison de ses caractéristiques techniques et opérationnelles compatibles avec les grands projets miniers. À cette fin, une étude comparative du système conventionnel basé sur le **convoyeur à bande** a été menée, en examinant le rendement, la consommation énergétique, les défaillances et les besoins en maintenance, afin d'évaluer son adéquation aux conditions d'exploitation de Blad El Hadba.

Les résultats de l'étude ont montré que l'utilisation de la technologie **Rail-Veyor** constitue une option plus pertinente pour le transport du minerai dans la mine de **Blad El Hadba**, grâce à sa meilleure efficacité opérationnelle, sa plus grande flexibilité, sa capacité d'adaptation aux exigences modernes de l'exploitation, ainsi qu'à sa contribution à la réduction de la consommation d'énergie et à l'amélioration des performances globales du système de transport minier.

ملخص :

يهدف هذا العمل إلى معالجة إشكالية الحفاظ على كفاءة أنظمة النقل المنجمي في مكن بلاد الحدبة على المدى الطويل، من خلال البحث عن حلول عقلانية تسمح بتحسين مخطط نقل الخام والانتقال من الوسائل التقليدية إلى أساليب نقل بديلة أكثر تطوراً وملاءمةً لخصوصيات المشروع. ويأتي هذا التوجه في إطار السعي إلى اعتماد تكنولوجيا حديثة مدعّمة بنظام آلي متطور، مع مراعاة متطلبات حماية البيئة، وتقليص استهلاك الطاقة، والرفع من مردودية الاستغلال، والحد من الأعطال التي تنعكس سلباً على استمرارية الإنتاج والقدرة التنافسية الاقتصادية.

وفي هذا السياق، برزت تقنية Rail-Veyor بوصفها إحدى الحلول الواعدة في مجال النقل المنجمي، نظراً لما توفره من خصائص تقنية وتشغيلية تتماشى مع طبيعة المشاريع المنجمية واسعة النطاق. ولهذا الغرض، تم إجراء دراسة مقارنة للنظام التقليدي المعتمد على الناقل الحزامي من حيث المردود، واستهلاك الطاقة، والأعطال، ومتطلبات الصيانة، بهدف تقييم مدى ملاءمته لظروف الاستغلال في بلاد الحدبة.

وقد أظهرت نتائج الدراسة أن استخدام تقنية Rail-Veyor يمثل خياراً أكثر مواءمة لنقل الخام في منجم بلاد الحدبة، لما يتمتع به من كفاءة تشغيلية، ومرونة أكبر، وقدرة أفضل على التكيف مع متطلبات الاستغلال الحديثة، إضافة إلى مساهمته في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الأداء العام لمنظومة النقل المنجمي.

Summary :

This work aims to address the problem of maintaining the efficiency of mining transport systems in the **Blad El Hadba** deposit over the long term, by seeking rational solutions that make it possible to optimize the ore transport scheme and move from conventional transport methods to more modern alternatives that are better suited to the specific conditions of the project. This approach is part of a strategy to adopt advanced technology supported by an automated system, while taking into account environmental protection requirements, reducing energy consumption, improving productivity, and limiting breakdowns that negatively affect production continuity and economic competitiveness.

In this context, **Rail-Veyor** technology has emerged as one of the most promising solutions in mining transport, due to its technical and operational characteristics, which are compatible with large-scale mining projects. To this end, a comparative study of the conventional system based on the **belt conveyor** was conducted, examining performance, energy consumption, failures, and maintenance requirements, in order to assess its suitability for the operating conditions at Blad El Hadba.

The results of the study showed that the use of **Rail-Veyor** technology is a more suitable option for ore transport in the **Blad El Hadba mine**, thanks to its better operational efficiency, greater flexibility, capacity to adapt to modern mining requirements, and its contribution to reducing energy consumption and improving the overall performance of the mining transport system.

Introduction générale :

En plus de ses ressources énergétiques, l'Algérie dispose d'un potentiel minier important, ce qui confère au secteur extractif une place stratégique dans la dynamique de développement économique national. Parmi les ressources minérales les plus significatives du pays, le phosphate occupe une position centrale en raison de son rôle fondamental dans l'industrie des engrais, la sécurité alimentaire et la valorisation locale des matières premières. La distribution géologique de cette ressource sur le territoire national ouvre des perspectives majeures pour la mise en place d'une filière minière intégrée, performante et durable.

Dans ce contexte, le gisement de Blad El Hadba, situé à Bir El Ater dans la wilaya de Tébessa, constitue l'un des projets miniers les plus prometteurs en Algérie. Ce projet s'inscrit dans un programme intégré d'exploitation, de transformation et d'exportation du phosphate, avec une mise en valeur industrielle destinée à alimenter la production d'engrais phosphatés et à renforcer la souveraineté industrielle du pays. Les estimations disponibles indiquent des réserves très importantes, avec un potentiel d'exploitation à long terme qui place ce gisement parmi les projets structurants du secteur minier national.

Cependant, l'exploitation d'un gisement de cette ampleur ne dépend pas uniquement des opérations d'extraction, mais repose également sur la performance du système de transport minier, qui constitue un maillon essentiel de la chaîne de production. En effet, le transport interne influence directement la continuité du flux de matière, les coûts d'exploitation, la consommation énergétique, la disponibilité des équipements et la sécurité des opérations. Dans les projets miniers à grande échelle, les solutions conventionnelles, telles que le transport par camions ou par convoyeurs à bande, montrent souvent leurs limites face aux longues distances, aux contraintes topographiques et aux exigences croissantes de productivité et de durabilité.

Dans cette optique, la recherche de solutions de transport innovantes devient une nécessité technique et économique. Parmi les technologies récentes, le système Rail-Veyor se distingue comme une solution moderne de manutention des matériaux en vrac, reposant sur un transport léger sur rail, à propulsion électrique, télécommandé et conçu pour s'adapter à des conditions d'exploitation complexes. Cette technologie offre des perspectives intéressantes pour le transport du phosphate, notamment dans les cas où les systèmes

conventionnels atteignent leurs limites en matière d'efficacité, de flexibilité et de performance énergétique.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt de l'utilisation du système Rail-Veyor pour l'acheminement du phosphate dans le cadre du projet de Blad El Hadba, à travers une analyse technique, économique et environnementale. L'étude vise à comparer la solution proposée avec les systèmes conventionnels afin d'identifier l'option la plus adaptée aux contraintes du site et aux objectifs de développement du projet.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux. Le premier chapitre présente le contexte général du projet de Blad El Hadba ainsi que les caractéristiques géologiques et minières du gisement. Le deuxième chapitre examine le système de transport actuellement envisagé, en analysant ses principes de fonctionnement, ses avantages et ses limites. Le troisième chapitre est consacré à la présentation détaillée du système Rail-Veyor, de ses composants et de son principe de fonctionnement. Enfin, le quatrième chapitre propose une comparaison technique et fonctionnelle entre le système conventionnel et la solution Rail-Veyor, afin d'orienter le choix vers l'option la plus pertinente pour le projet.

La conclusion générale met en évidence les apports de l'étude et souligne le potentiel du Rail-Veyor comme solution de transport innovante, performante et durable pour l'exploitation du phosphate à Blad El Hadba.

Chapitre I :

Aperçu géologique et minier
de la mine de phosphate de
Bled El Hadba

I.1. Introduction :

L'industrie phosphatée algérienne voit le jour à la fin du XIX^e siècle avec la découverte et la mise en exploitation de plusieurs gisements situés à l'Est du pays, notamment El Kouif, Mzaita, Ras El Oued et Bordj El Ghedir. En 1962 débute l'exploitation du plus vaste gisement de phosphate algérien : le djebel Onk.

Dans le cadre de ce chapitre, nous proposons une présentation de la géologie régionale de la région de Bir El Ater, suivie d'une description plus détaillée de la géologie locale du gisement de Bled El Hadba.

I.2. Géologie régionale de Bir El Ater :

Les gisements phosphatés de Bir El Ater s'inscrivent dans une succession de formations sédimentaires développées dans l'Est et le Sud-Est constantinois (Algérie), caractérisées par la présence de concentrations minérales enrichies en phosphate. Ces horizons phosphatés, d'intérêt économique, font partie d'un vaste ensemble de gisements formés à la période de fin Crétacé-Éocène à travers l'ensemble du Maghreb.

I.3. Présentation du secteur minier de Bir-El-Ater :

I.3.1. Situation géographique :

La région de Bir El Ater est située au Sud-Est de l'Algérie, à environ 100 kilomètres au sud de la wilaya de Tébessa et à 20 kilomètres de la frontière algéro-tunisienne, sur la route qui relie Tébessa à El Oued. Cette zone constitue la limite naturelle entre les Hauts-Plateaux constantinois et le domaine saharien.

Le massif du djebel Onk forme un ensemble calcaire s'étendant sur environ 20 km de long et culminant à 1198 m d'altitude au niveau du djebel Tarfaya. Ce massif représente l'extrémité orientale des monts des Nemencha, qui prolongent vers l'Est le massif des Aurès. Les altitudes les plus basses au pied du djebel Onk se situent autour de 635 m.



Figure I.1 : Carte de situation géographique de la région de Bir-El-Ater.

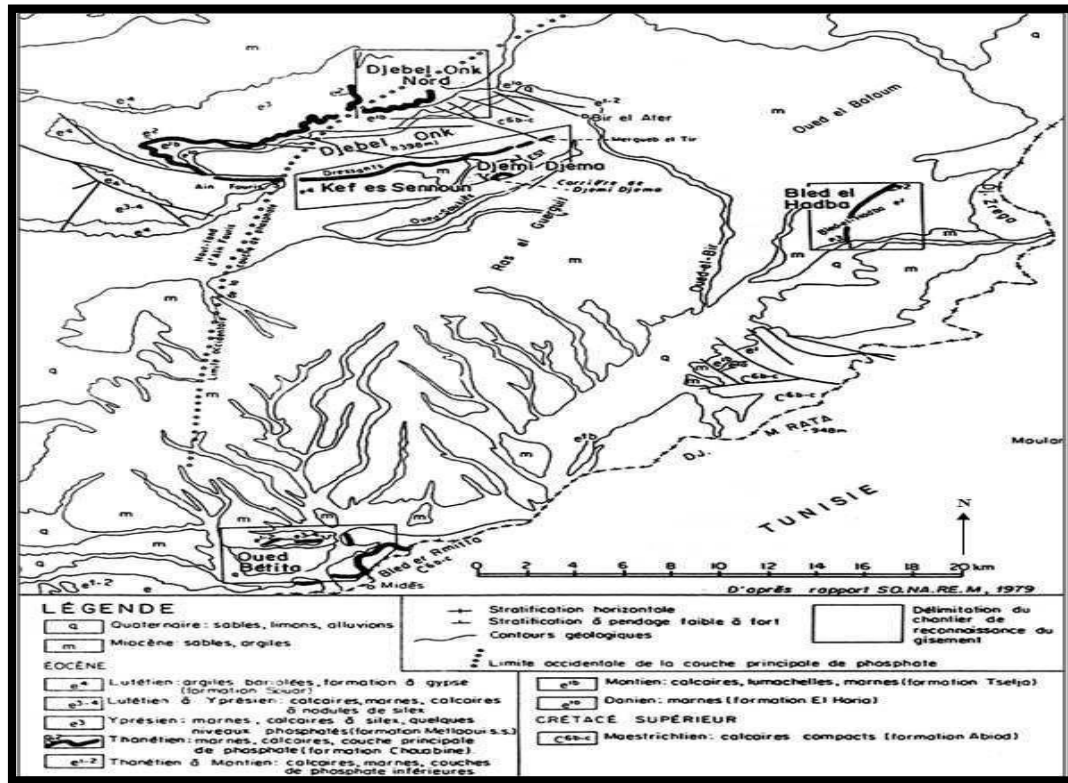
Cinq gisements ont été identifiés dans la région de Bir El Ater :

- Le gisement de Djemi-Djema ;
- Le gisement de Kef Essenoun ;
- Le gisement de Djebel Onk Nord ;
- Le gisement d'Oued Betita ;
- Le gisement de Bled El Hadba.

Celui de Bled El Hadba constitue l'objet de notre étude géologique et géostatistique. Il se situe à 15 km à l'Est de la mine de Djemi-Djema, à environ 5 km de la frontière algéro-tunisienne, et s'étend sur le flanc Ouest du djebel Zerga. À l'est, ce gisement ne se trouve qu'à 9 km du gisement de Djebel Mrata, en Tunisie.

Le climat de la région est subaride, de type continental, marqué par deux saisons bien distinctes : un hiver froid et rigoureux, et un été où les températures peuvent dépasser 45 °C. Les précipitations sont faibles, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 300 mm/an, ce qui correspond à un climat qualifié de semi-aride. Le réseau hydrographique de Bir El Ater se compose de trois principaux bassins versants : celui de l'oued Rheznata au Nord-Est de la

commune, ainsi que ceux des oueds Soukiès et Horchane au Sud de Bir El Ater. La population de la région est peu dense. La situation économique de la zone s'est nettement améliorée depuis l'installation du complexe minier de Bir El Ater, qui a favorisé l'extension



et le développement de la ville.

Figure I.2. Carte de situation géographique et géologique des gisements de Bir-El-Ater. (Prianet Cortiel, 1993)

I.3.2. Litho stratigraphie de la région de Bir El Ater :

Les études les plus significatives consacrées à la stratigraphie de Bir El Ater sont celles de Dussert (1924), Flandrin (1948), Visse (1951), Ranchin (1963), Villain (1979) et Chabou-Mostefai (1987).

La série sédimentaire affleurante est représentée par une succession stratigraphique s'étendant du Crétacé supérieur (Maestrichtien) au Paléogène moyen (Lutétien), surmontée par une formation sablo-argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire.

Les affleurements se présentent, de bas en haut, de la manière suivante :

a) Crétacé :

Ce sont les sédiments les plus anciens situés au Sud de l'anticlinal du djebel Onk, fortement affectés par la tectonique. Seuls les dépôts du Maestrichtien débouchent en surface.

- **Maestrichtien** : il est composé de calcaires blancs massifs, accompagnés d'intercalations marneuses riches en silex, situés au Sud de l'anticlinal du djebel Onk. À leur sommet, ces calcaires forment une surface érodée, rubéfiée et facilement identifiable dans le paysage.

b) Paléogène :

Cette série est constituée de sédiments marins présentant des épaisseurs importantes, pouvant atteindre environ 350 m. Les variations lithologiques ainsi que les fossiles associés permettent d'y distinguer les subdivisions stratigraphiques suivantes :

- **Danien** : il est formé par un complexe marneux épais, partagé en Danien inférieur et Danien supérieur.
 - **Danien supérieur** : il est représenté par des calcaires compacts de couleur crème ou blanche, alternant avec des marnes argileuses assez épaisses, présentant une lithologie distinctive. Les marnes sont tendres et schisteuses, avec des épaisseurs variant de quelques dizaines de centimètres à environ un mètre.
 - **Danien inférieur** : il est constitué d'argiles marneuses schisteuses de couleur gris foncé ou brun-vert, avec des intercalations de marnes très compactes disposées en bancs réguliers. L'épaisseur de cette partie est de l'ordre de 30 à 40 m.
- **Montien** : cet étage se caractérise par des puissantes couches calcaires entrecoupées de niveaux marneux. Il affleure en plusieurs localités : le djebel Onk, le djebel Darmoun, le djebel Djemi-Djema, l'oued Betita et Bled El Hadba. Son épaisseur moyenne est environ 60 m.

Si tu veux, tu peux maintenant m'envoyer la suite (par exemple le sous-paragraphe suivant sur le Lutétien ou le Quaternaire) et je continuerai de la même façon.

- **Thanétien** : c'est l'horizon hôte de la minéralisation phosphatée. Il est visible sur le flanc de l'anticlinal du djebel Onk et présente une épaisseur d'environ 72 m. Il se divise en deux parties principales :
 - **Thanétien inférieur** : il est formé de marnes gris foncé à noir, de nature schistoïde. En partie inférieure, on observe des conglomérats intercalés de fines couches phosphatées, ainsi que deux niveaux de marnes marqués par une faune caractéristique (Thésiteo gracitis). Au sommet apparaissent des intercalations phosphatées pouvant atteindre jusqu'à 2 m, surmontées par des calcaires et des marnes riches en gros gastéropodes. La puissance de cette partie varie entre 30 et 40 m.
 - **Thanétien supérieur** : il débute par un niveau dolomitique à gastéropodes, recouvert par une couche phosphatée d'une épaisseur moyenne d'environ 30 m au djebel Onk et à Bled El Hadba, cette épaisseur diminuant progressivement vers le Nord jusqu'à disparition.

c) Éocène :

- **Yprésien** : il repose en discordance directe sur les dépôts du Thanétien et s'étend largement sur la région de Bir El Ater. Son épaisseur est d'environ 32 m. Il est constitué par :

Des calcaires à silex, avec une couche phosphatée intercalée d'environ 3 m ;

Des calcaires marneux, porteurs de lits phosphatés situés dans la partie supérieure, d'une épaisseur d'environ 4,5 m ;

Des calcaires à nodules de silex noir, formant une patine ferrugineuse, de couleur noire à brun-rouge. L'épaisseur de cette dernière partie est de 26 m.

- **Lutétien** : les roches de cet étage recouvrent en concordance les séries yprésiennes. Elles sont largement réparties dans la zone du djebel Darmoun, avec une puissance d'environ 270 m. On distingue, de bas en haut :
 - **Lutétien inférieur** : il se caractérise par des changements de faciès :

Disparition progressive des calcaires, remplacés par des marnes blanches, crayeuses, contenant des géodes de quartz et des silex, d'une épaisseur d'environ 30 m ;

Des calcaires massifs, de couleur blanche, nodulaires, riches en quartz, d'une épaisseur d'environ 15 m ;

Des dépôts de gypse, alternant avec des bancs de calcaires, représentant une épaisseur d'environ 150 m.

- **Lutétien supérieur** : ce faciès est de nature évaporitique. Il est composé de gypse, d'argiles verdâtres, d'argiles phosphatées vertes et de bancs de calcaires. À la base, on observe une argile verte phosphatée associée à des bancs de calcaire d'une épaisseur d'environ 10 m. Au sommet, la série se termine par des argiles vertes intercalées de bancs de gypse. L'épaisseur totale de cet horizon est de l'ordre de 65 m.

d) Néogène :

- **Miocène** : il est représenté par un complexe de roches terrigènes composé de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes. Le Miocène est subdivisé en trois parties:
 - **Miocène inférieur** : il est formé principalement de conglomérats, de sables à gros grains et de niveaux sableux.
 - **Miocène inférieur** : il est constitué de sables blancs à grains moyens, associés à de minces couches d'argiles silteuses. La puissance de cette unité est d'environ 200 m.
 - **Miocène moyen** : il est de nature essentiellement argileuse, de couleur brunâtre, parfois schisteuse, avec des intercalations de sables à grains fins et moyens. L'épaisseur de cette partie est de l'ordre de 100 m.
 - **Miocène supérieur** : il se compose de roches sablo-argileuses, de grès à bancs de graviers et contient fréquemment de gros blocs arrondis.

e) **Quaternaire** : les formations quaternaires occupent de vastes superficies dans la région. Elles sont principalement constituées d'éboulis de pente, de dépôts sableux, de dépôts éoliens, de graviers, de blocs, ainsi que de dépôts alluvionnaires et fluviaux.

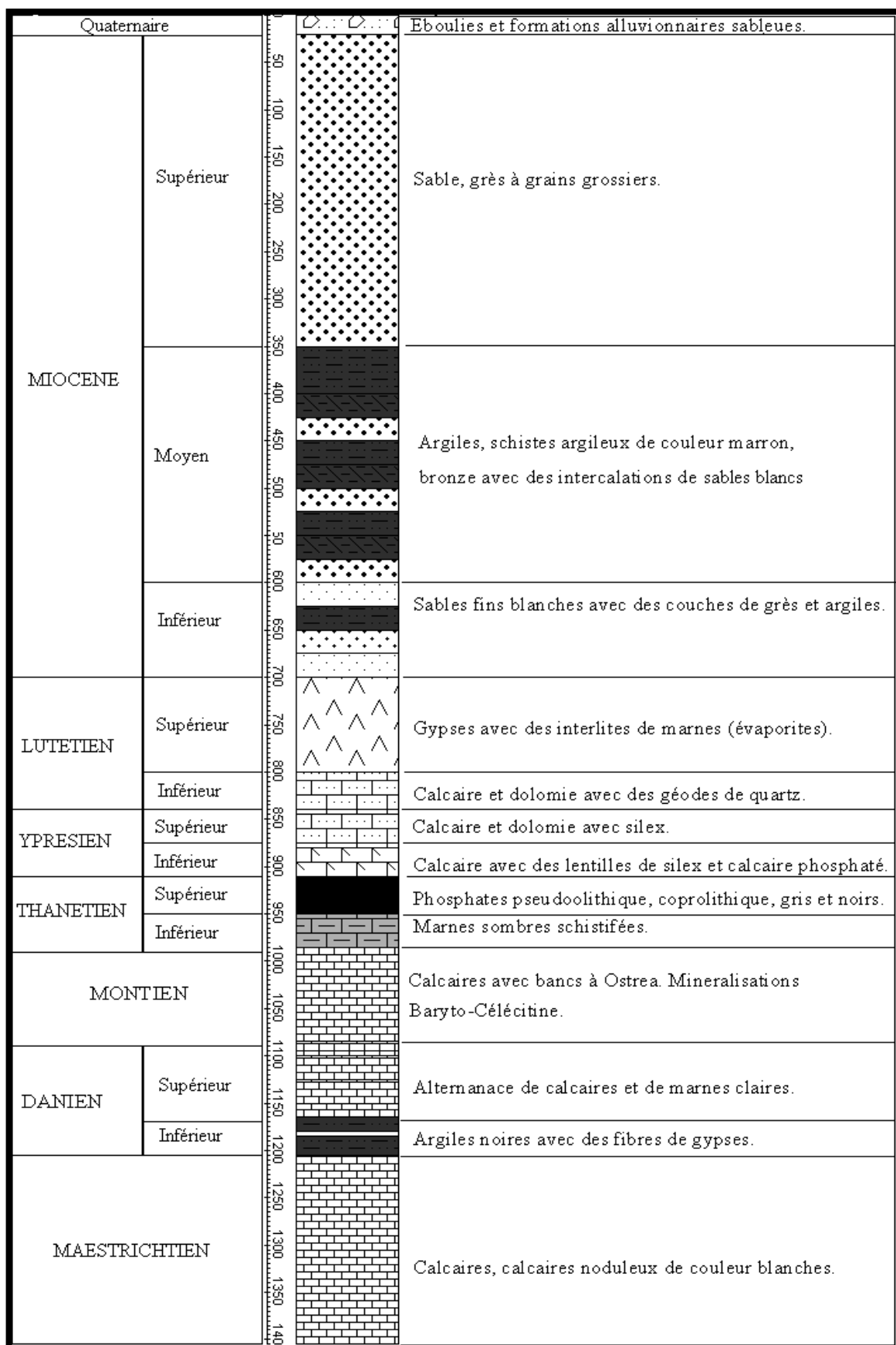


Figure I.3 : Colonne litho stratigraphique de la région de Bir-El-Ater 3
Algérie Orientale-(D'après Cielenskyet al, 1988).

I.3.3. Tectonique :

La région de Bir El Ater appartient, avec l'Atlas tunisien, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien. La série supérieure de l'Éocène du bassin Djebel Onk–Gafsa–Métloui est structurée en une succession d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques, souvent failles sur leurs flancs, d'axe généralement orienté SW–NE et décalés par des accidents transverses d'orientation N 120° à N 140° E.

Les anticlinaux des djebels Onk, Djemi-Djema et de l'oued Betita se situent le long de la bordure de la flexure Sud-Atlasique, qui correspond à une zone de contact entre le domaine atlasique mobile et la plate-forme saharienne stable. Ils se rattachent en particulier à la branche Nord de cette flexure, de direction Est–Ouest (figure II.4).

L'anticlinal du djebel Onk prolonge les monts de Nemencha vers l'Est, coudant en péripli sous les formations du Miocène, selon une direction E-NE. Cet anticlinal est asymétrique, avec un flanc méridional fortement incliné (pendage d'environ 80°) et un flanc septentrional très faiblement incliné (environ 10°).

La chronologie des phases de déformation responsables de la structure actuelle peut être résumée comme suit :

a) Tectonique syn-sédimentaire :

Une phase compressive de direction NW–SE, contemporaine de la sédimentation paléogène, se manifeste par des ondulations et des failles de type syn-sédimentaires. Cette tectonique précoce entraîne des lacunes de sédimentation dans la série Paléocène–Éocène et conduit à la mise en place de dispositifs paléogéographiques en hauts-fonds et sillons qui contrôlent la position et l'épaisseur des horizons phosphatés. Ces déformations peuvent être liées à la remontée diapirique des évaporites triasiques, notamment au Paléocène–Éocène.

b) Tectonique post-Éocène moyen et anté-Miocène :

Cette phase coïncide avec l'émersion de la série au Lutétien supérieur et correspond à une phase majeure de plissement des Aurès ainsi qu'à des déformations transverses, d'orientation N 120° à N 150°, qui engendrent une première déstructuration de la série Crétacé supérieur–Éocène en petits horsts et grabens allongés suivant la direction N 170°

E. Ces structures seront ensuite affectées par la pénéplanation et l'érosion différentielle anté-Miocène. La majorité de ces plissements est antérieure aux dépôts des sables miocènes. C'est dans ce cadre tectonique que se met en place l'anticlinal du djebel Onk.

c) Tectonique tardive, tardi-Miocène (post-Burdigalien) à Pliocène–Pléistocène :

Il s'agit de la phase majeure de plissement de l'Atlas tunisien. Cette phase plisse les séries Crétacé supérieur–Paléocène–Éocène et Miocène en grandes structures antiformes et synformes, associées à des failles inverses et des décrochements.

- Les synformes réactivent les structures antérieures en les transformant en horsts et grabens ; ils engendrent vers le Sud, sur le flanc inverse des méga-plis du djebel Onk et de Djemi-Djema, des structures complexes. Cette tectogenèse est à l'origine de la configuration structurale actuelle de la région de Bir El Ater.

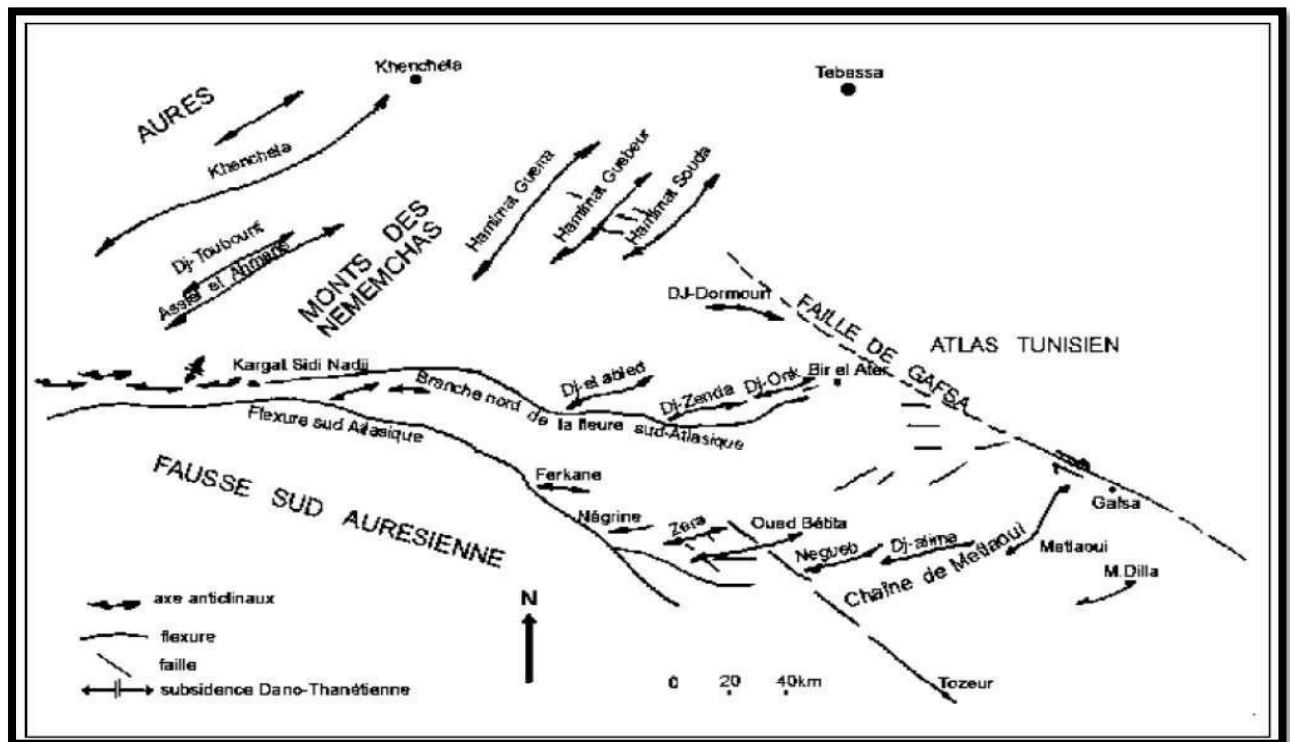


Figure I.4 : Carte structurale de la région du Bir-El-Ater à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métlaoui-Djebel Onk (Aissaoui, 1984).

I.4. Géologie locale du gisement de phosphate de Bled El Hadba :

I.4.1. Situation géographique :

Le gisement potentiel de Bled El Hadba se situe à environ 14 km au Sud-Est de Bir El Ater et à 5 km de la frontière algéro-tunisienne (figure II.5). En ligne droite, il se trouve à une distance d'environ 15 km du complexe minier et de la carrière de Djemi-Djema.

Les altitudes de la zone varient entre 730 et 790 m. La superficie de la zone explorée par les sondages carottés est d'environ 2,9 km². Morphologiquement, le relief est très peu accidenté par rapport aux autres gisements présents dans la région de Bir El Ater.

Les coordonnées UTM de ce gisement sont les suivantes :

X = 421 310 à 424 200

Y = 3 833 730 à 3 837 780

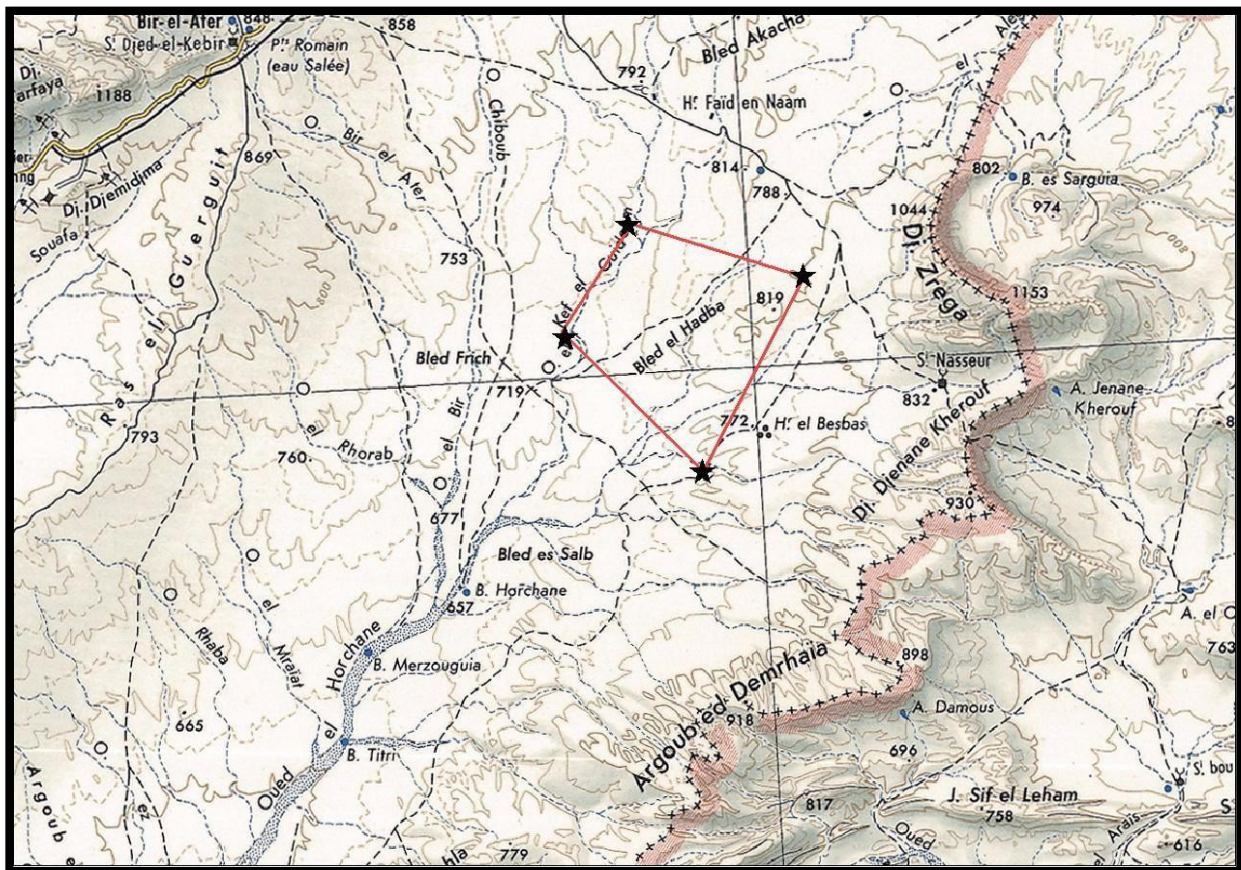


Figure I.5 : Carte de situation géographique de gisement de Bled El Hadba.

I.4.2. Contexte géologique du gisement de Bled El Hadba :

La géologie du gisement de Bled El Hadba est relativement simple. Les couches phosphatées ainsi que leurs encaissants plongent de manière monoclinale, selon une pente douce

comprise entre 6 et 10° vers l'Ouest et le Nord-Ouest, ce pendage devenant toutefois plus marqué en direction du Sud du gisement.

Malgré cette simplicité apparente, la tectonique reste assez complexe : on observe des décrochements nets, horizontaux, ainsi que des failles orientées selon plusieurs directions.

L'épaisseur des couches de phosphate est importante, de l'ordre de 41 m. Une grande partie du gisement se situe à une profondeur comprise entre 0 et 60 m. La teneur moyenne en P_2O_5 dans le gisement de Bled El Hadba est de 21,05%.

Le faisceau global des couches phosphatées comprend trois sous-couches superposées : une sous-couche sommitale, une sous-couche principale et une sous-couche basale. Les coupes géologiques ont permis de mettre en évidence les variations de l'épaisseur et de l'extension latérale de ces sous-couches à l'intérieur du gisement.

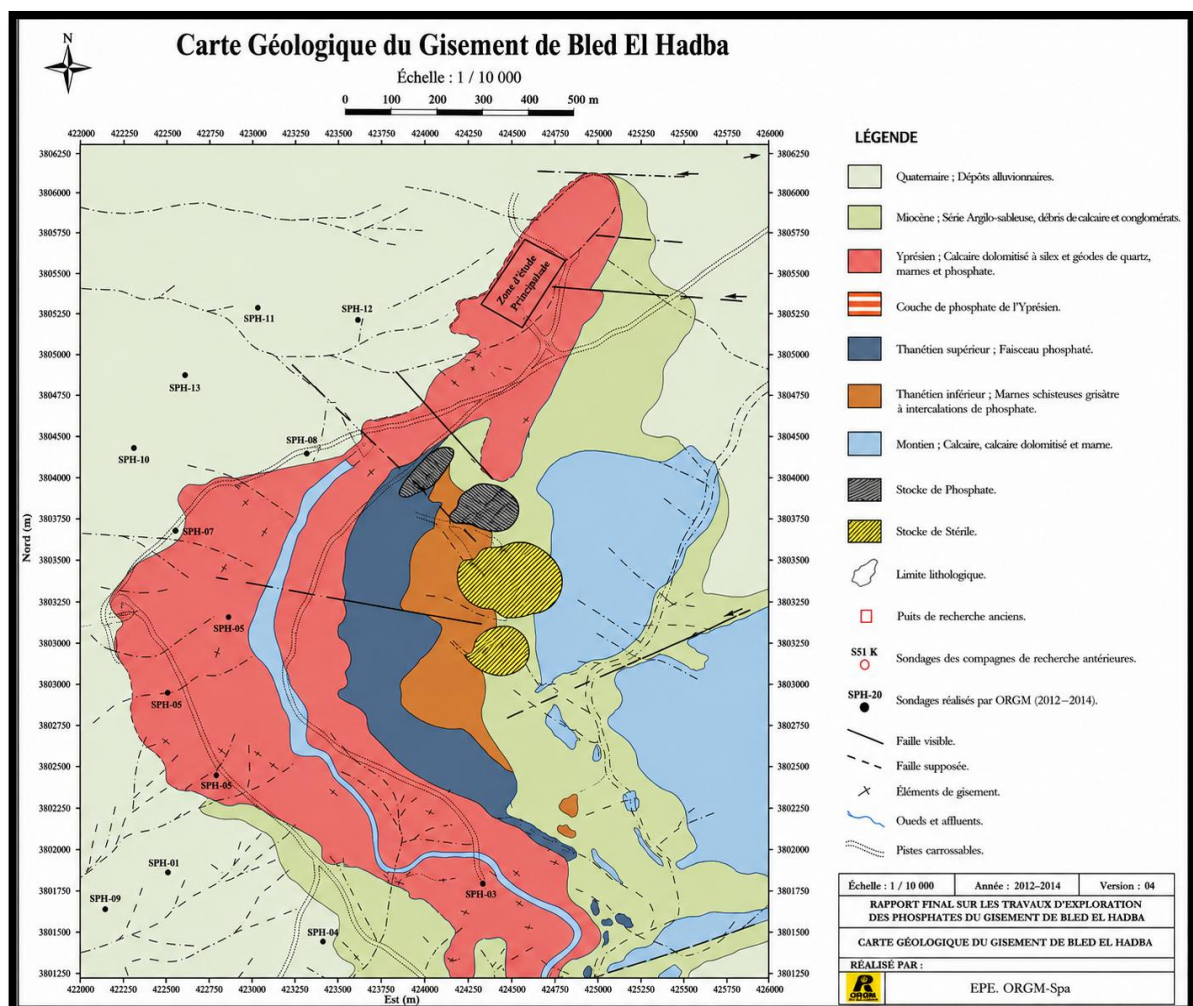


Figure I.6 : Carte géologique du gisement de Bled El Hadba.

I.4.3. Lithostratigraphie :

La succession lithostratigraphique du gisement, d'une manière générale, présente une grande similitude avec celle des gisements de Djemi-Djema et de Kef Essenoun. Toutefois, des variations lithologiques importantes ont été observées à l'intérieur du faisceau phosphaté, sous la forme d'une bande d'affleurement orientée NE–SW. Cette bande s'enfonce vers l'Ouest, passant sous les calcaires à silex de l'Yprésien et sous les sables du Miocène.

a) Paléocène

- **Montien** : le Montien affleure au Sud-Est du gisement. À la base de cet étage, on observe des calcaires silicifiés lumachéliques, riches en bioclastes et en autres restes fossiles. Ces calcaires sont recouverts par une série d'alternances d'argiles lumachéliques, d'argiles calcaires et de marnes dolomitiques. Au-dessus apparaît un banc de dolomie, surmonté par des calcaires gris clairs, légèrement phosphatés. L'épaisseur de ce complexe peut atteindre 100 m.
- **Thanétien** :
 - **Thanétien inférieur** : à la base, on rencontre des marnes noires qui passent graduellement à des calcaires légèrement lumachéliques, avec quelques intercalations de phosphates de couleur brunâtre à grisâtre. La puissance de cette partie varie entre 30 et 40 m.
 - **Thanétien supérieur** : cet étage constitue la couche phosphatée caractéristique, formée de grains phosphatés de type cuprolithique et pseudo-oolithique, cimentés par une matrice carbonatée, avec présence d'oxydes de fer, de débris osseux et de dents. Cette couche se subdivise en trois sous-couches : une couche basale, une couche principale et une couche sommitale. L'épaisseur totale de la couche phosphatée est d'environ 30 m.

b) Yprésien : la série du Thanétien est recouverte par une série calcaire-dolomitique à silex. Cette série, d'âge Yprésien, est carbonatée, marneuse, dolomitique et calcaire, et légèrement phosphatée ; elle peut atteindre jusqu'à 56 m d'épaisseur (sondage S-5H).

Dans sa partie médiane, la série yprésienne renferme de minces bancs de phosphates dolomitiques, d'une épaisseur de 1,7 à 2,3 m, intercalés entre des marnes dolomitiques et des calcaires.

c) Miocène : il recouvre la série précédente. Son épaisseur augmente progressivement vers l'Ouest et en direction du Nord-Ouest, atteignant 77 m dans le sondage S-7H. La série est composée principalement de sables, avec des intercalations de calcaire marneux, ainsi que de fragments (« beignet ») de dolomie.

d) Quaternaire : les dépôts du Quaternaire recouvrent la majeure partie du territoire étudié. Ils sont essentiellement constitués de dépôts éoliens et alluvionnaires.

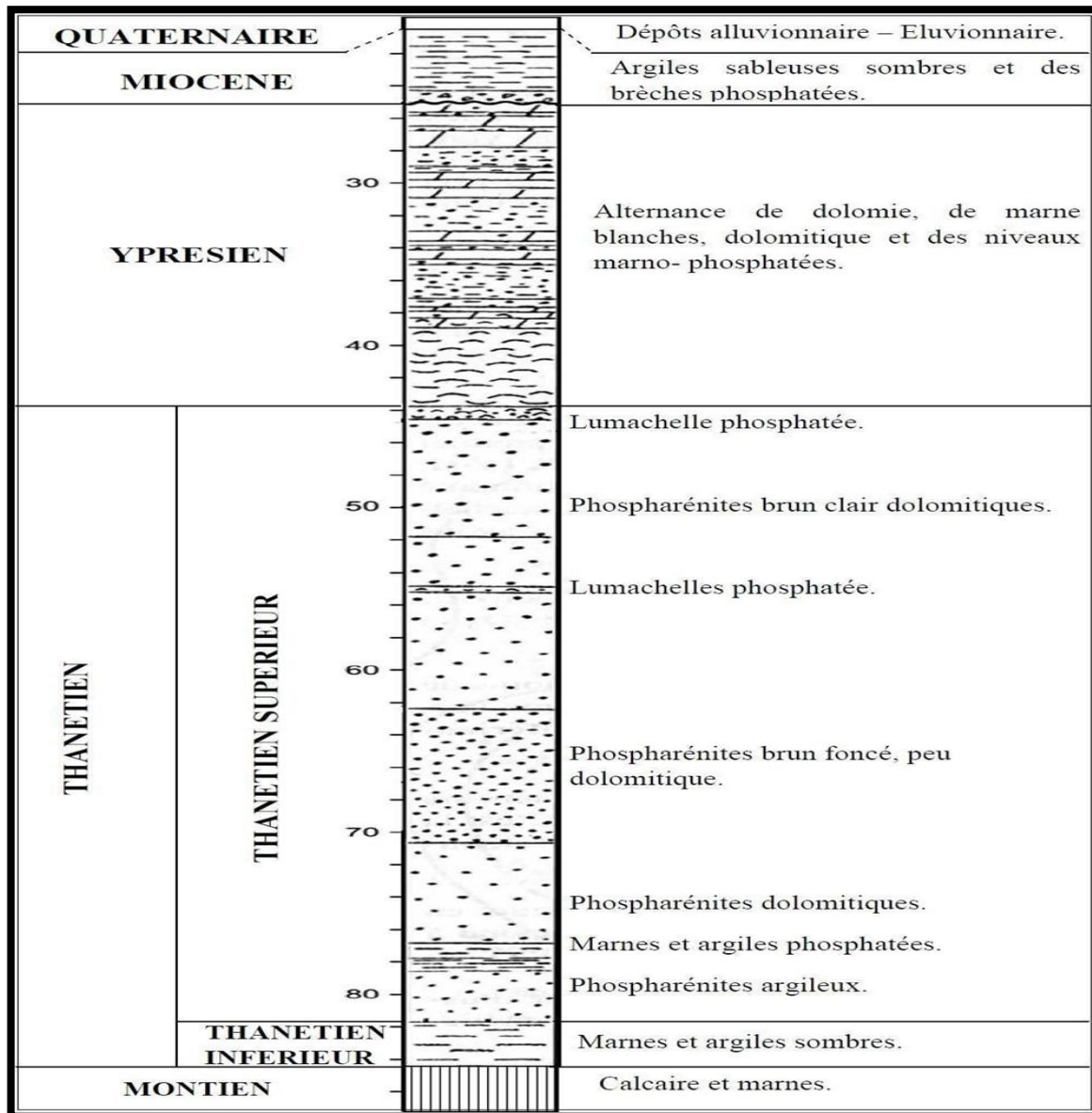


Figure I.7: Litho-stratigraphie du gisement de Bled El Hadba (CielenskyetBenchernine, 1987).

I.4.4. Tectonique du gisement :

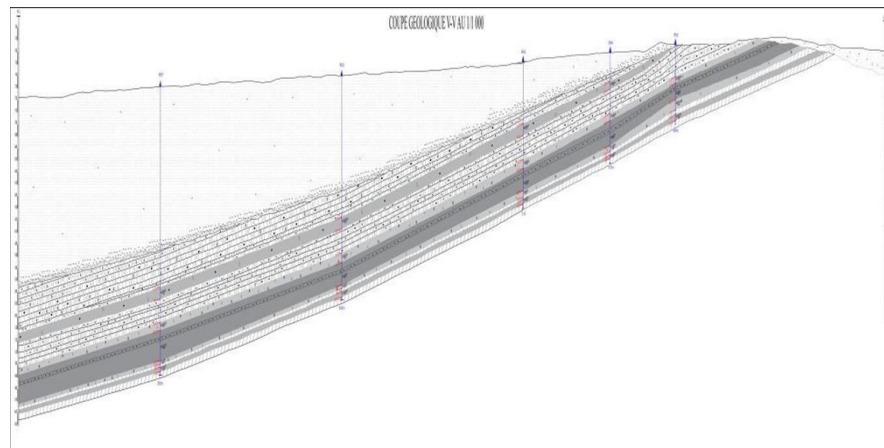
La zone de Bled El Hadba correspond au flanc Ouest de la structure antiforme du djebel Zerga (1153 m), dont la ligne de crête marque la frontière algéro-tunisienne.

Cette structure antiforme, à sommet de Crétacé supérieur, représente le prolongement Nord de la structure du djebel M'rata en Tunisie. Par rapport à cet allongement anticlinal principal, la série phosphatée de Bled El Hadba se situe sur son flanc Ouest (Prianet Cortiel, 1993).

La structure géologique globale du gisement est relativement simple : la série Paléocène–Éocène ainsi que le Miocène se présentent sous forme monoclinale, avec un pendage compris entre 6 et 10°, correspondant au flanc Ouest du djebel Zerga orienté vers le Nord-Ouest. La zone de Bled El Hadba est toutefois affectée par une série de failles et de décrochements horizontaux de direction NW–SE. Ces décrochements sont visibles sur les cartes géologiques, mais ils n'entraînent pas de modifications majeures de la géométrie des couches phosphatées. Des failles secondaires, à faibles rejets de 5 à 20 m et de direction WNW–ESE, ont également été mis en évidence.

Les coupes géologiques établies à travers le gisement de Bled El Hadba (figure I.8) montrent que le faisceau phosphaté se présente sous forme d'une bande d'affleurement orientée NE–SW. Cette couche phosphatée s'enfonce vers l'Ouest sous les calcaires de l'Yprésien et les sables du Miocène. Vers l'Est, les marnes situées sous la série phosphatée affleurent, suivies par des calcaires et marnes miocènes ; la série phosphatée n'est donc pas exprimée dans cette direction.

Dans la partie Nord des terrains étudiés, on observe la disparition de la couche phosphatée en allant vers le sondage S-57K. Pri Janet et Cortiel (1993) expliquent cette discontinuité par une phase d'érosion anté-Miocène. Cette discordance se reconnaît également dans les sondages S-11H et S-55K.



Echelle: 1/1 000	Année: 2012 - 2014	Annex N°: 05 e
RAPPORT FINAL SUR LES RESULTATS DES TRAVAUX D'EXPLORATION DES PHOSPHATE DU GISEMENT DE BLED EL HADBA		
COUPE GEOLOGIQUE SUIVANT LE PROFIL V-V		
Réalisé par :		
 EPE.ORG.M.SPA		

Légende:	
	Dépôts détritiques du Miocène (Sables et Argiles).
	Conglomerats de base du Miocène.
	Calcaire organogène blanchâtre, fortement gypseux.
	Calcaire lumachellique, résiduellement phosphaté, à nodules de silex et géodes de quartz.
	Phosphate à nodules de silex et débris de calcaire et marne.
	Marne gypseuse, blanchâtre, à nodules de silex, résiduellement phosphatée.
	1: CS + CB: Phosphate lumachellique à géodes de quartz. 2: CM: Phosphate.
	Marne pélitique litée, résiduellement phosphatée.
	Phosphate coprolithique, à ciment marneux.
	Sondages d'exploration ORGM 2012-2014.

Figure I.8 : Coupe géologique représentent le prolongement des couches phosphatées du gisement de Bled El Hadba

I.5. Aperçu hydrologique :

Les chaînes de montagnes de l'Atlas saharien constituent la ligne de partage des eaux entre le bassin méditerranéen et le bassin saharien. D'un point de vue topographique, la zone de Bled El Hadba appartient au bassin versant saharien et alimente finalement le Chott Melghir.

Il n'existe aucun cours d'eau pérenne à l'intérieur de la zone du projet ni à sa proximité immédiate. En revanche, de nombreux réseaux d'érosion de type dendritique et linéaire témoignent de l'existence d'un écoulement des eaux de surface lors des périodes de précipitations abondantes.

La zone de Bled El Hadba est tributaire de l'oued Horchane, qui s'écoule vers le Sud dans le bassin versant saharien avant de se jeter finalement dans le Chott Melghir. Le ruissellement des eaux de surface en provenance du site du projet se dirige directement vers les bassins versants de l'oued El Kef El Guidoum et de l'oued El Louz, ces deux oueds confluent au Sud-Ouest de la zone du projet pour former l'oued Horchane.

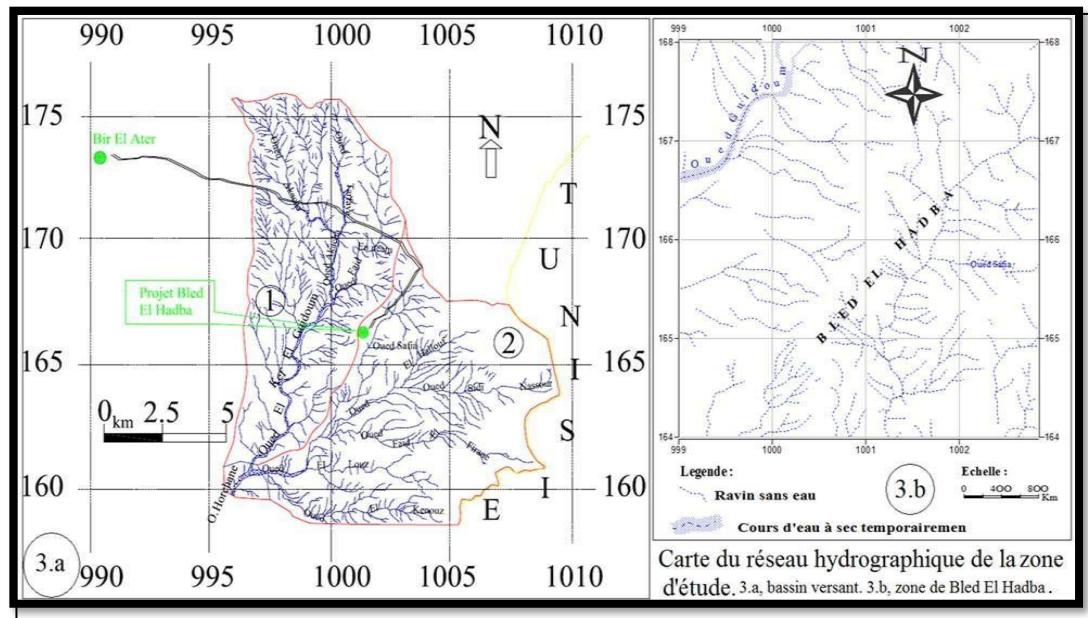


Figure 1.9 : Réseau d'écoulement des eaux de surface.

I.5.1 La climatologie :

Les conditions climatiques de la zone sont de type continental, marquées par des hivers froids et des étés chauds. La zone d'étude se situe dans une zone de transition entre la région semi-aride de Tébessa et la région subaride de Négrine.

I.5.2. Température :

Sur une moyenne portant sur cinq années, les températures suivent un cycle annuel comparable : en hiver, elles oscillent autour de 7 °C, puis augmentent progressivement à partir du mois de mai pour atteindre environ 26,5 °C en été avant de diminuer à nouveau en automne, passant de 23 à 7 °C. Les températures extrêmes enregistrées dans la région étudiée sont les suivantes :

- Une valeur minimale de -6,2 °C en février 1996 ;
- Une valeur maximale de 45,8 °C en août 1993.

I.5.3. Pluviométrie :

Les précipitations durant la saison estivale sont très rares, et les périodes sans pluie de plus d'un mois sont fréquentes. Les épisodes pluvieux s'étendent en moyenne sur 66 à 107 jours par an. Les orages sont importants et fréquents, en particulier au cours des mois d'août et de septembre.

La neige et le gel sont rares, mais la température descend souvent sous 0 °C en hiver, ce qui peut entraîner des gelées occasionnelles.

I.5.4. Le vent :

D'après la compilation réalisée par SOMIPHOS à la fin de l'année 2013, les principales caractéristiques des conditions de vent sont les suivantes :

- Les vents dominants proviennent du Nord-Ouest, du Sud-Ouest et de l'Ouest ;
- Les vents de Nord-Est, de Nord et de Nord-Ouest apportent souvent des précipitations durant la saison humide et atténuent les températures élevées en été ; leur fréquence représente environ 46% ;
- La partie Nord de la wilaya n'est pas fortement exposée au Sirocco. Les massifs de Tébessa et de Nemencha forment une barrière naturelle qui réduit l'intensité de ce vent.

I.6. Conclusion :

Vers l'étude du transport minier L'étude géologique constitue une étape essentielle dans tout projet minier, car elle permet de décrire le mode de formation du gîte, la nature de son dépôt et ses caractéristiques structurales. À partir de ces données, il devient possible de définir les conditions géotechniques et géométriques dans lesquelles s'inscrit l'exploitation du gisement de Bled El Hadba.

Dans la suite de ce mémoire, l'accent sera mis sur le système de transport au sein de la mine, en particulier sur l'application de la technologie de rail-convoyeur. Cette solution sera analysée dans le contexte de la géologie du gisement, de la configuration du chantier et des contraintes liées au transport du phosphate de la zone d'extraction jusqu'aux installations de traitement et de stockage.

Chapitre II :
Le transport dans la mine de
Bled El Hadba
"Convoyeur à bande"

II.1 Introduction :

Dans toute exploitation minière moderne, le transport du minerai représente une composante essentielle de la chaîne de production. À la mine de phosphate de Bled El Hadba, plusieurs modes de transport peuvent être envisagés ou appliqués pour évacuer le phosphate des zones d'extraction vers les installations de traitement, les stockages ou les points de transfert.

Le convoyeur à bande constitue l'un des moyens les plus couramment utilisés pour le transport continu du minerai. À Bled El Hadba, cette solution peut être employée, entre autres, pour relier les gradins d'exploitation aux stations de concassage ou pour acheminer le phosphate le long de la pente de la mine jusqu'au sol de la mine. Ce chapitre se propose de présenter le principe de fonctionnement d'un convoyeur à bande, d'en décrire les principales composantes et de situer son rôle dans le schéma global de transport du phosphate, indépendamment de toute solution alternative que pourrait représenter un système ferroviaire ou un rail-convoyeur.

II.2 Systèmes de transport interne dans la mine de Bled El Hadba :

Dans les mines à ciel ouvert de phosphate, le transport interne représente une étape essentielle dans la chaîne d'exploitation minière. À la mine de Bled El Hadba, ce système repose sur l'utilisation combinée de plusieurs équipements tels que les excavateurs, les chargeuses, les camions de transport, les concasseurs et les convoyeurs à bande.

L'extraction du minerai est réalisée au niveau des gradins à l'aide d'excavateurs hydrauliques et de chargeuses, qui assurent le chargement des camions de transport. Ces derniers acheminent le phosphate brut vers les stations de concassage primaire où la granulométrie du minerai est réduite afin de faciliter son transport et son traitement.

Après l'opération de concassage, le minerai est transféré vers les zones de stockage ou les unités de traitement grâce aux convoyeurs à bande. Ces équipements occupent une place importante dans les exploitations minières modernes en raison de leur capacité élevée de transport, de leur fonctionnement continu et de leur faible consommation énergétique par rapport au transport routier classique.

Le système peut également inclure des alimentateurs, des trémies de stockage ainsi que des dispositifs de contrôle et de nettoyage permettant d'assurer la régularité du flux de minerai et la réduction des pertes de matériau pendant le transport.

Ainsi, l'intégration des convoyeurs à bande avec les autres équipements de chargement, de concassage et de manutention permet d'assurer un transport interne continu, fiable et adapté aux grandes capacités de production du gisement phosphaté de Bled El Hadba.

II.3. Convoyeur à bande :

Un convoyeur est en général un mécanisme composé de plusieurs éléments, dont le rôle principal est de transporter une charge ponctuelle (cartons, bacs, sacs, etc.) ou un produit en vrac (terre, poudre, aliments, etc.) d'un point A à un point B.

II.3.1. Définition d'un convoyeur :

Le convoyeur est un système de manutention automatique destiné à déplacer des produits finis ou bruts d'un poste de travail à un autre, en utilisant un mécanisme de transmission de puissance. Cette puissance est transmise de l'arbre moteur vers un ou plusieurs arbres récepteurs à l'aide de courroies ou de chaînes.

Le produit ou la marchandise est disposé sur une bande ou sur une tôle qui se déplace de manière continue dans un circuit fermé. La vitesse de déplacement dépend de la vitesse de rotation du moteur et peut être augmentée ou réduite selon les besoins de l'opérateur, tout en tenant compte de paramètres tels que la productivité et le rythme de production.

Le convoyeur facilite les opérations de réception et d'expédition de la marchandise. Il est également adapté pour alimenter les postes de travail ainsi que pour évacuer les produits finis.

Les convoyeurs trouvent une large application dans de nombreux procédés industriels, notamment pour le transfert de pièces, de sable, de produits alimentaires, de sacs de ciment ou de bagages de voyage.

Leur rôle principal consiste à remplacer une partie du travail manuel de l'ouvrier, ce qui limite les efforts physiques liés au déplacement du produit et améliore directement la productivité, en permettant un transport beaucoup plus rapide, comme illustré sur la figII.1.

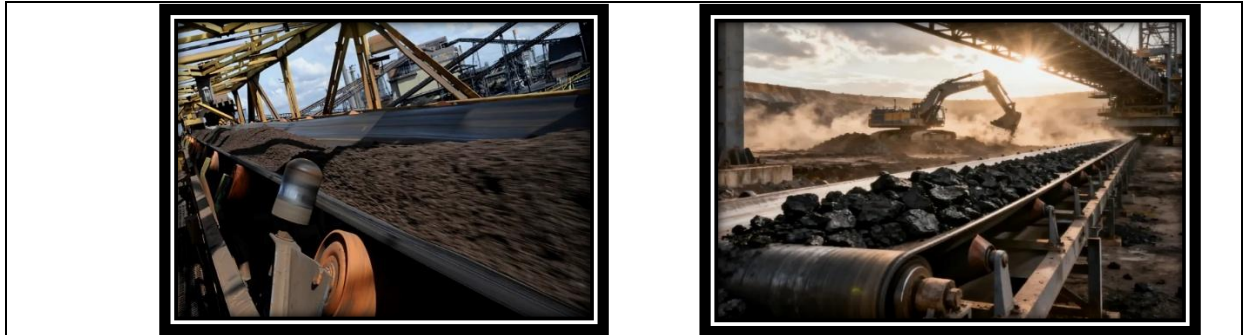


Figure II.1 Convoyeur a bande.

II.3.2. Composants et leur dénomination :

Le dessin ci-dessous montre les principaux composants qui constituent un transporteur à bande :

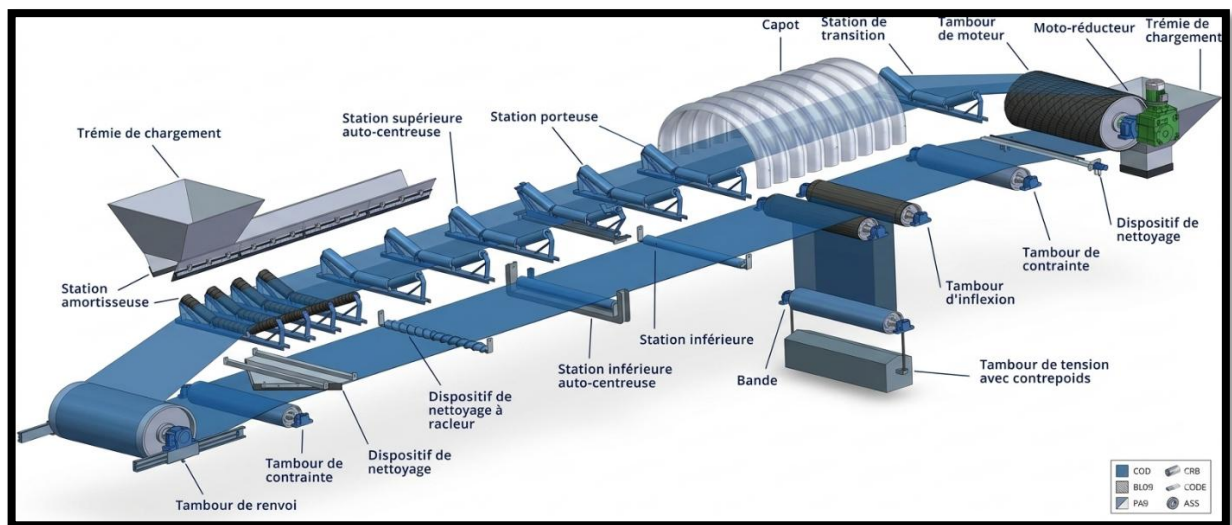


Figure II.2 Les différents composants du convoyeur à bande.

La bande transporteuse : éléments flexible qui supporte et transporte le matériau sur toute la longueur du convoyeur.

Tambours moteur et de renvoi : rouleaux qui entraînent ou guident la bande, le tambour moteur transmet la puissance, le tambour de renvoi oriente le retour de la bande.

Rouleaux porteurs et retourneurs : supportent la bande chargée et vide, réduisent la flèche et limitent l'usure.

Système de tension : maintient la bande tendue pour éviter le glissement et assurer une bonne adhérence sur les tambours.

Zones de chargement et de déchargement : points d'alimentation (gréerie, concasseur) et de sortie du matériau (stock, usine, wagon).

Dispositifs de nettoyage : raclettes, brosses ou laveurs qui retirent le matériau accroché à la bande pour limiter les pertes et l'encrassement.

Équipements de sécurité : arrêts d'urgence, capteurs de décalage, protections mécaniques et capots anti-poussière pour assurer la sécurité des opérateurs et la continuité de l'exploitation.

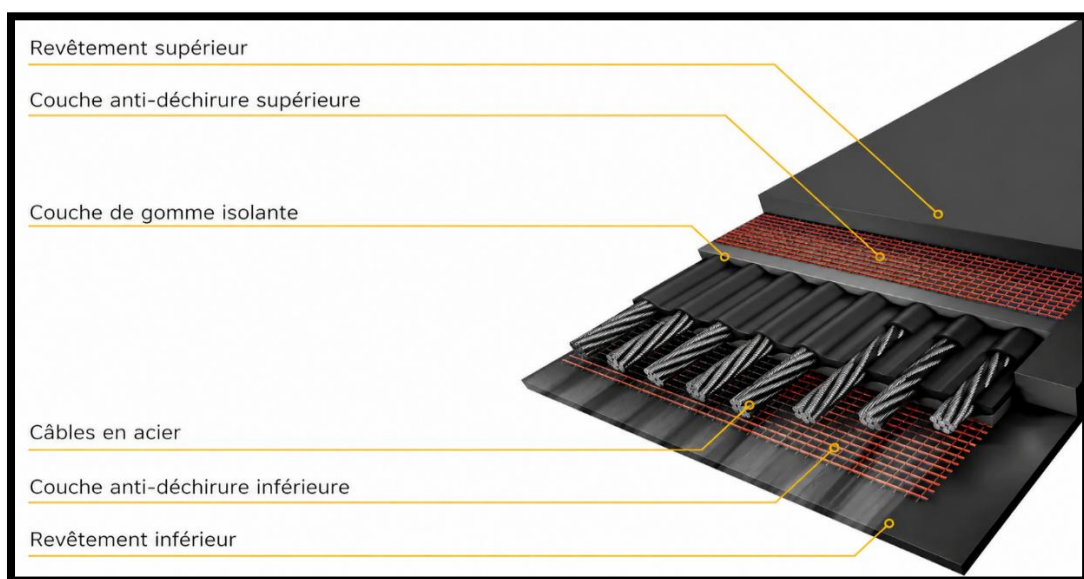


Figure II.3 : Les composants de la bande transporteuse

II.3.3. Avantages et inconvénients du convoyeur à bande :

➤ **Avantages :**

- Le convoyeur à bande est l'un des moyens de transport les plus économiques en termes de coût d'exploitation et de maintenance, notamment pour les mines gérant de grands volumes de matière par jour.

- Il provoque peu de dégradation ou de broyage du produit transporté, ce qui est particulièrement intéressant pour les minerais sensibles (phosphate, minerais friables, etc.).
- Le convoyeur peut être adapté à des changements de niveau significatifs, en suivant la pente du terrain ou en intégrant des rampes inclinées, ce qui le rend compatible avec les configurations de mines à ciel ouvert ou souterraines.
- Le matériau reste visible en permanence sur la bande durant le transport, ce qui facilite le contrôle visuel de la qualité, de la granulométrie et de la continuité du flux.
- Le chargement peut être réalisé à plusieurs points le long du convoyeur, ce qui permet une grande flexibilité dans l'alimentation du système (multiple gradins, concasseurs, ou postes de stockage).

➤ **Inconvénient :**

- La conception classique d'un convoyeur à bande est ouverte, ce qui implique, dans certains cas industriels exigeants, l'ajout de couvertures, de capots ou de bacs de récupération qui augmentent le coût d'installation ainsi que l'encombrement de l'ouvrage.
- Lorsque le matériau est adhérent ou humide (phosphate humide, argiles, boues), le nettoyage de la bande devient délicat et le rendement des dispositifs de nettoyage (raclettes, brosses, laveurs) reste généralement limité, entraînant une accumulation de matériau résiduel.
- Il existe presque toujours une fuite de matière au niveau du point de déversement, qui se manifeste par des chutes de poussières ou de fines, ce qui génère des pertes de production, des besoins constants de nettoyage et des contraintes supplémentaires d'entretien dans le contexte minier.

II.3.4. Types et configurations des convoyeurs à bande :

Le choix d'un convoyeur à bande dépend de plusieurs paramètres liés à la nature du matériau transporté, aux conditions d'exploitation et à l'environnement de travail. Parmi les principaux critères à prendre en considération figurant:

- L'inclinaison du convoyeur ;
- La densité du matériau ;

- La granulométrie et la forme des particules ;
- L'angle interne de frottement du matériau ;
- Le coefficient de frottement entre le matériau et la surface supérieure de la bande ;
- La teneur en eau du matériau ;
- Les conditions ambiantes, notamment l'humidité et la température.

Dans le cas des convoyeurs inclinés, le transport du matériau peut engendrer plusieurs phénomènes de glissement susceptibles d'affecter la stabilité de la charge. Ces phénomènes se manifestent principalement par :

- Le glissement global de la charge vers la partie basse du convoyeur ;
- Le glissement interne des matériaux, lorsque les éléments supérieurs se déplacent par rapport à ceux situés en dessous ;
- Le glissement des fragments de plus grande taille vers le bas du convoyeur ;
- Le glissement des gros éléments sur les particules plus fines.

Ces effets peuvent entraîner une perturbation de l'écoulement du matériau, une usure prématurée de la bande ainsi que des dommages sur certains composants du convoyeur. Il est donc nécessaire d'intégrer ces contraintes dès la phase de sélection et de dimensionnement du système de transport.

Les convoyeurs à bande peuvent être conçus selon plusieurs configurations afin d'améliorer les performances d'exploitation et les conditions de sécurité, notamment en réduisant le nombre d'installations nécessaires ainsi que la fréquence des opérations de nettoyage. Pour les convoyeurs en pente, différents profils de bande ont été développés afin de limiter les pertes de matériau et les phénomènes de déversement, tels que la bande en auge avec bords de contenance et tasseaux, la bande plate munie de dispositifs de retenue, ou encore la bande à profil fermé en forme de sac suspendu, qui permet également de mieux maîtriser les émissions de poussières. Dans certaines conditions d'exploitation, il peut être nécessaire d'encoffrer totalement le convoyeur afin de limiter la dispersion des poussières dans l'environnement. La figure II.4 présente les principaux types et profils de bandes utilisés dans les systèmes de convoyage.

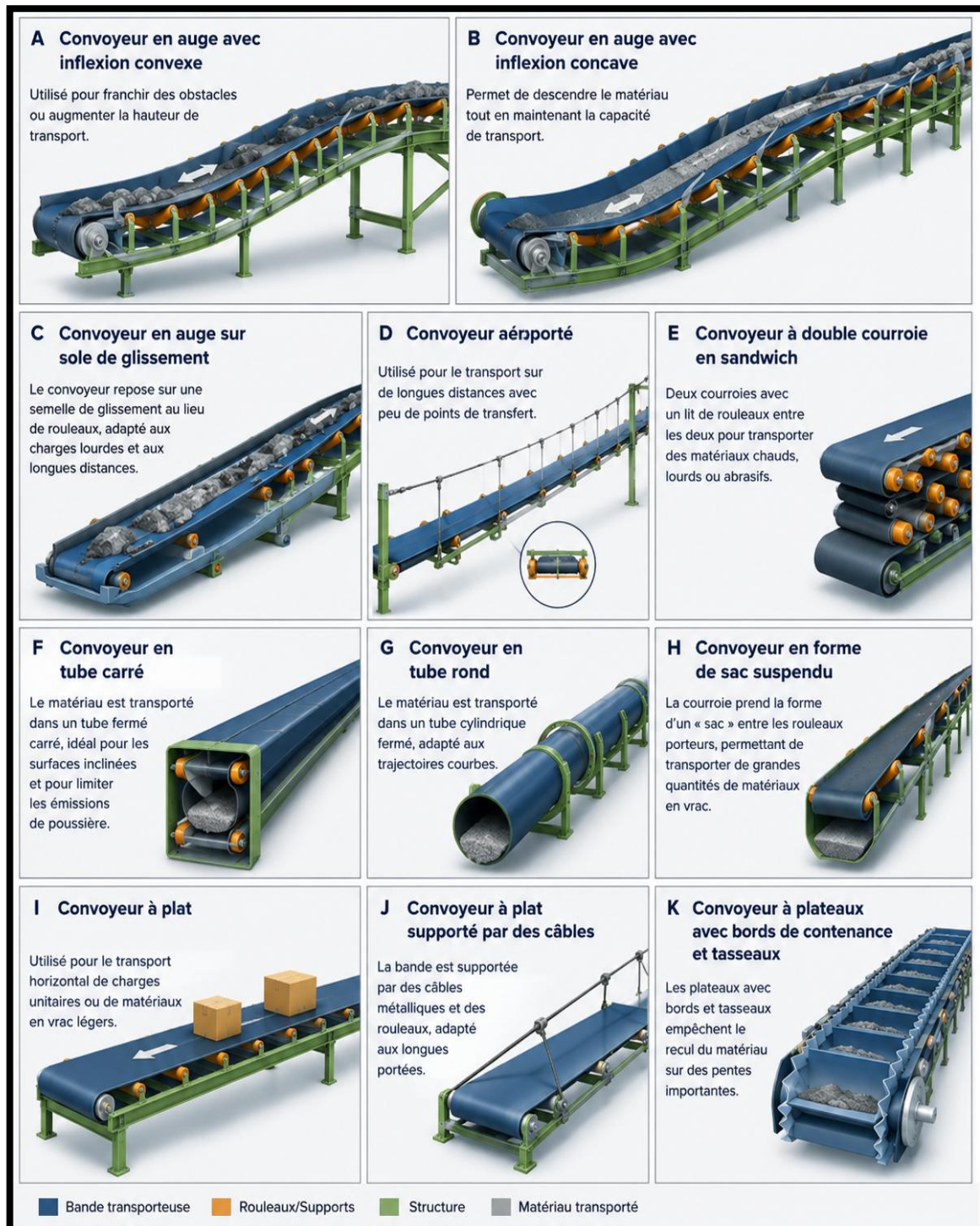


Figure II.4 Type et configuration des convoyeurs à bande.

II.4. Caractéristiques techniques des convoyeurs à bande :

Dans la mine de phosphate de Bled El Hadba, le convoyeur à bande constitue un moyen de transport continu particulièrement adapté à l'acheminement de grandes quantités de minerai sur des distances importantes. Son fonctionnement dépend essentiellement de la puissance

du moteur d'entraînement et de la tension effective développée dans la bande. En pratique, une partie importante de la puissance installée est convertie en effort utile de traction, tandis qu'une autre partie est perdue sous forme de frottements, de glissements et d'échauffement des organes mécaniques.

Le bon fonctionnement du système repose donc sur un équilibre entre la puissance fournie, la tension de la bande et la charge transportée. Si cet équilibre n'est pas respecté, on peut observer des phénomènes de déversement, de glissement sur les tambours, d'usure prématurée de la bande et une diminution de la fiabilité de l'ensemble du convoyeur. Dans un contexte minier comme celui de Bled El Hadba, ces défauts peuvent également affecter la continuité de l'alimentation de l'usine de traitement du phosphate ainsi que la sécurité d'exploitation.

Le rôle du convoyeur à bande est de transporter en continu des matériaux en vrac, homogènes ou hétérogènes, sur des distances allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa bande en élastomère assure une double fonction : elle reçoit le matériau transporté et transmet l'effort de traction nécessaire à son déplacement. Comparé au transport par camion, le convoyeur à bande présente plusieurs avantages dans une exploitation phosphatière : une maintenance plus régulière et plus maîtrisée, une réduction des effectifs nécessaires, une baisse de la consommation énergétique, une continuité du flux de matière, une diminution des risques d'accidents et, dans certains cas, une réduction notable des coûts d'exploitation. Pour les grands systèmes de convoyage, les économies réalisées peuvent atteindre 40 à 60% par rapport au transport routier.

À titre indicatif, si un convoyeur doit transporter un débit **Q** de 2000 t/h avec une puissance spécifique moyenne de 1,2 kWh/t, la puissance théorique requise est de :

$$P = Q \times e = 2000 \times 1,2 = 2400 \text{ kW}$$

En tenant compte d'un rendement global de 95%, la puissance moteur à installer devient :

$$P_m = 2400 / 0,95 \approx 2526 \text{ kW}$$

Cet exemple montre que, pour des débits importants comme ceux rencontrés dans une mine de phosphate, la sélection correcte du convoyeur et de son entraînement est un paramètre déterminant pour assurer la performance globale du système.

II.5. Composants du convoyeur et leurs dénominations :

Le convoyeur à bande est constitué de plusieurs organes mécaniques qui assurent le transport continu du phosphate depuis la zone d'extraction jusqu'aux points de transfert ou de traitement. Le schéma ci-dessous présente les principaux éléments du système.

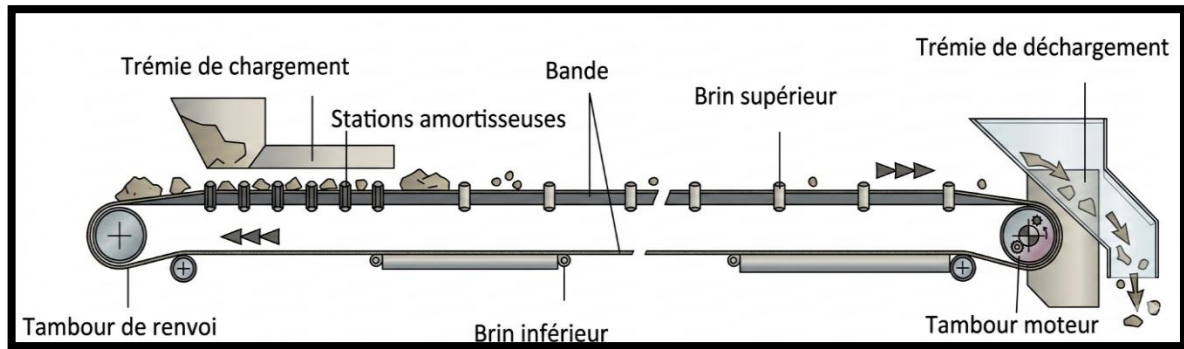


Figure II.5 : Schéma de principe d'un convoyeur à bande

II.5.1. Tambour :

Le tambour assure l'entraînement de la bande ou son changement de direction. Dans une exploitation phosphatière comme celle de Bled El Hadba, il doit garantir une transmission régulière du mouvement malgré la présence éventuelle de fines, de poussières et de variations de charge. Son revêtement peut être muni d'une garniture afin d'augmenter l'adhérence, de limiter l'usure et de favoriser le centrage de la bande.

II.5.2. Garnitures de tambours :

La garniture du tambour a pour rôle principal d'améliorer le frottement entre la bande et le tambour, ce qui réduit le risque de glissement, en particulier lorsque le matériau transporté est humide ou poussiéreux, comme c'est souvent le cas dans le phosphate. Elle contribue également à diminuer l'usure par abrasion et à prolonger la durée de service du tambour. Selon la configuration choisie, elle peut aussi jouer un rôle autonettoyant et faciliter l'alignement de la bande. Le choix de la garniture doit être adapté aux conditions de fonctionnement et aux caractéristiques de la courroie utilisée.

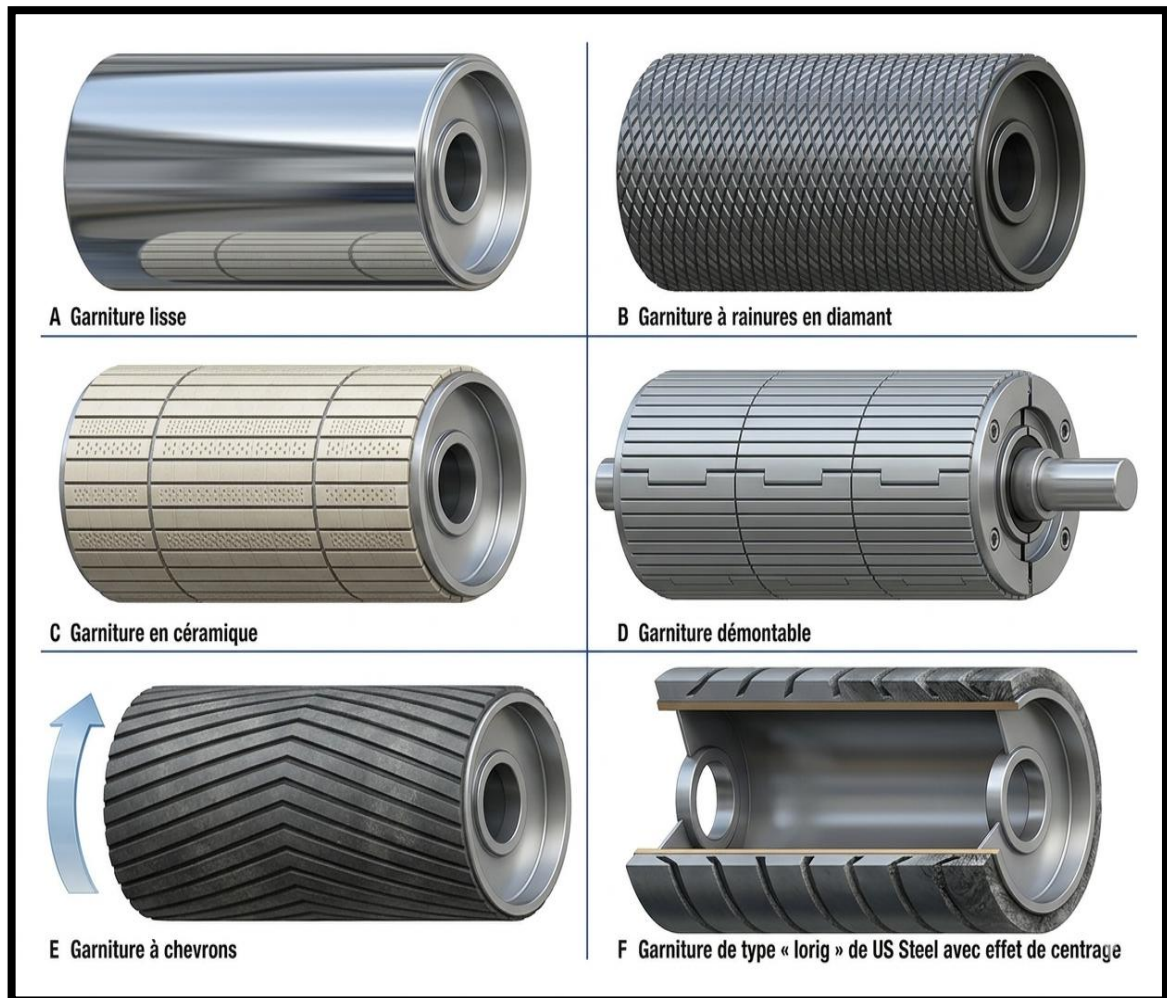


Figure II.6 types de garnitures de tambour.

➤ **Remarque technique :**

Dans le cas du gisement de Bled El Hadba, l'utilisation d'un convoyeur à bande peut présenter certaines limites, notamment en présence de poussières phosphatées, d'une humidité variable et de fortes contraintes d'exploitation liées à la pente du terrain. Ces conditions imposent une maintenance rigoureuse, un réglage correct de la tension et une surveillance continue des organes d'entraînement afin d'éviter le glissement, l'usure prématurée et les pertes de matière.

Exemple de vérification simple de dimensionnement pour Bled El Hadba :

Dans le cas du gisement de Bled El Hadba, les valeurs de réserve et de teneur varient selon les études, avec des estimations situées autour de 841 à 893 millions de tonnes et une teneur

moyenne en P2O5 d'environ 21,65% dans les travaux récents. À partir d'un débit nominal de 2 000 t/h, la quantité de phosphate contenue dans le minerai est estimée comme suit :

$$QP_{2O5} = 2000 \times 0,2165 = 433 \text{ t/h}$$

Autrement dit, le système de transport doit assurer l'acheminement de 2 000 t de minerai par heure, dont environ 433 t correspondent au P2O5 contenu, sur la base de la teneur retenue. Si le convoyeur fonctionne pendant 20 h par jour, la masse journalière transportée devient :

$$Q_{\text{jour}} = 2000 \times 20 = 40000 \text{ t/jour}$$

Cet ordre de grandeur montre qu'un système de transport continu est mieux adapté qu'un transport discontinu pour une mine phosphatière de grande capacité comme Bled El Hadba, où la régularité du flux et le haut débit constituent des exigences essentielles.

II.5.3. Emplacement des tambours :

- **Largeur de la bande** : elle détermine les dimensions générales du tambour.
- **Diamètre du tambour** : il dépend du type de bande et de ses caractéristiques mécaniques.
- **Mode de fixation de l'axe** : l'axe peut être fixé par bague de verrouillage, clavette ou soudage.
- **Fonction du tambour** : il peut être de commande, de renvoi ou de contrainte.
- **Angle d'enroulement α** : il représente l'angle de contact de la bande sur le tambour d'entraînement.
- **Tensions de la bande $T1$ et $T2$** : elles influencent directement le bon fonctionnement du convoyeur.

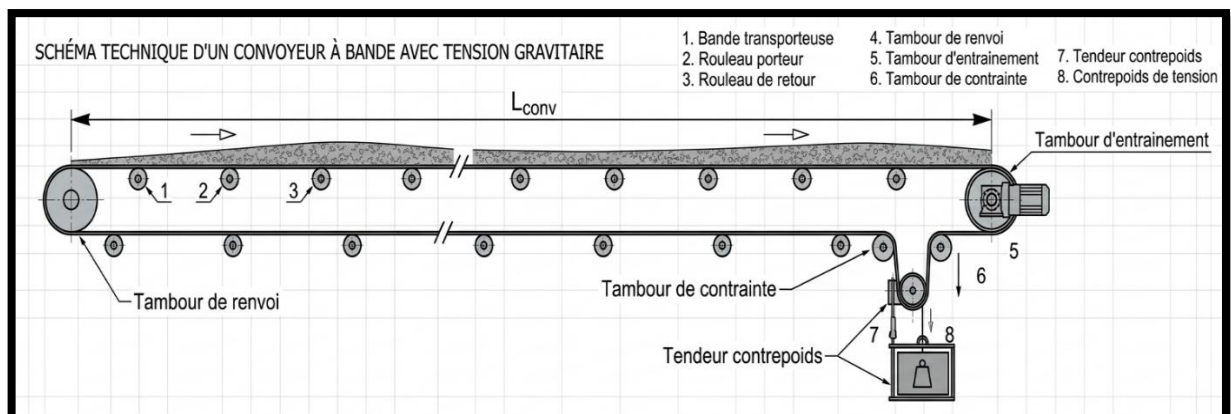


Figure II.7 : Emplacement des tambours.

II.5.4. Tambour de commande (tête motrice ou d'entraînement) :

Le tambour de commande constitue l'organe principal responsable de la mise en mouvement de la bande transporteuse. Dans une exploitation minière, il transmet l'effort nécessaire au déplacement du phosphate sur toute la longueur du convoyeur, en assurant une traction régulière malgré les variations de charge et les conditions parfois sévères d'exploitation. Il peut être réalisé sous forme d'un tambour classique entraîné par un moteur-réducteur, ou sous forme d'un tambour moteur intégré.

II.5.5. Tambour de renvoi :

Le tambour de renvoi assure le guidage de la bande à l'extrémité opposée du convoyeur. Dans les installations minières, il joue un rôle essentiel dans le retour de la bande vide et dans le maintien d'un alignement correct du système. Son revêtement n'est pas toujours nécessaire, mais il peut être ajouté dans certains cas afin d'améliorer l'adhérence ou de réduire l'usure. Son diamètre est généralement inférieur à celui du tambour de commande.

II.5.6. Tambour de contrainte :

Les tambours de contrainte, ou tambours d'inflexion, sont utilisés pour augmenter l'angle d'enroulement de la bande sur le tambour moteur. Ils permettent également de dévier la bande dans les zones où la configuration du convoyeur l'exige, notamment au niveau des dispositifs de tension à contrepoids, des stations de chargement ou des systèmes de déchargement mobiles. Leur présence améliore le fonctionnement général du convoyeur et contribue à une meilleure stabilité de la bande.

II.7. Différents types d'entraînement des convoyeurs à bande :

Dans le domaine minier, deux grands types d'entraînement peuvent être distingués pour les convoyeurs à bande :

➤ L'entraînement traditionnel :

Il repose sur un groupe motopropulseur composé d'un tambour de commande et d'un tambour de renvoi placé à l'autre extrémité du convoyeur. La puissance est transmise par un réducteur directement accouplé au tambour, ou par une transmission à arbre direct ou

parallèle. Ce système est largement utilisé dans les installations minières de surface pour le transport de matériaux en vrac tels que le phosphate.

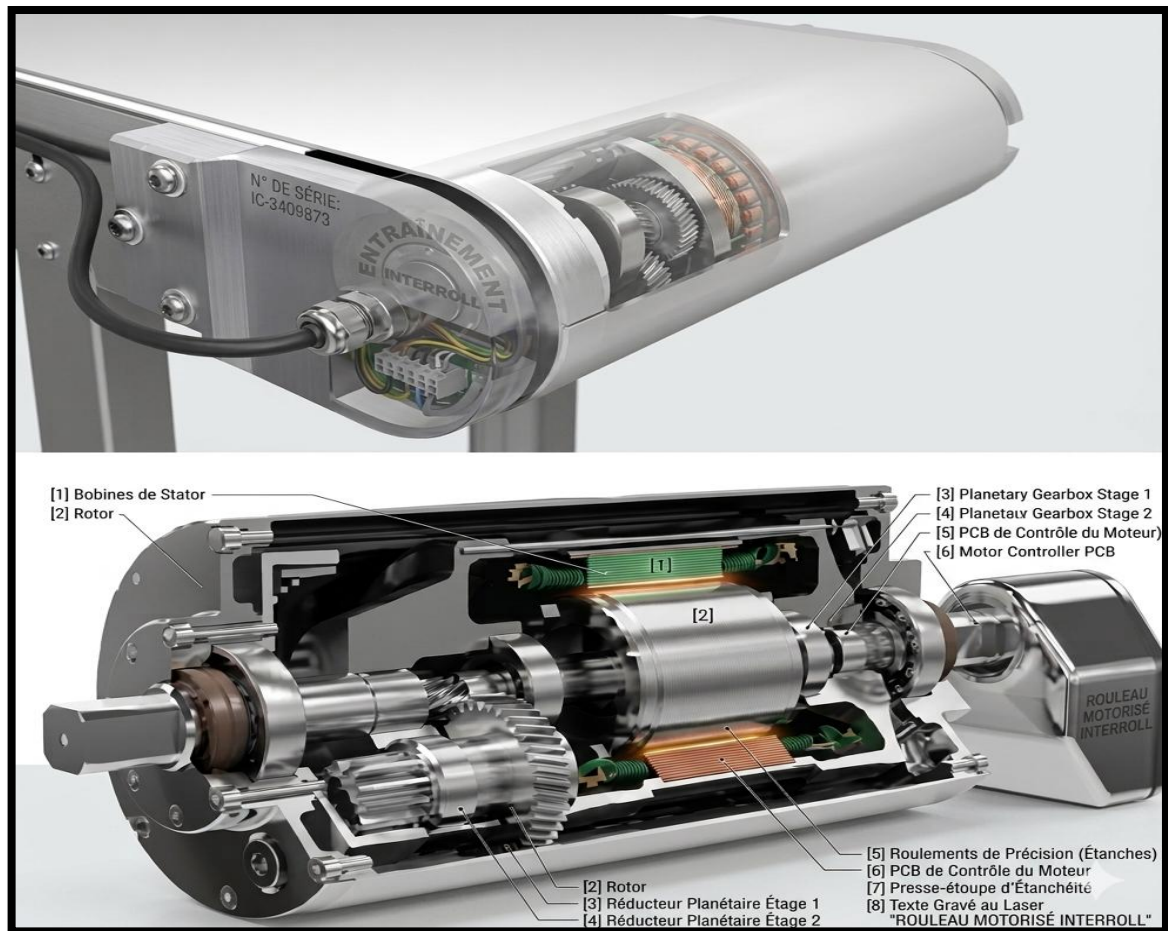


Figure II.8 : Tête d'entraînement classique.

➤ **Tambour motorisé :**

Dans le contexte de la mine de phosphate de Bled El Hadba, le tambour motorisé constitue une solution d'entraînement compacte et adaptée aux systèmes de transport continu. Le moteur, le réducteur et les roulements sont intégrés dans un ensemble fermé, placé à l'intérieur du tambour, ce qui permet d'entraîner directement la bande sans recourir à des transmissions extérieures complexes. Cette conception améliore la protection des organes mécaniques contre la poussière, ce qui est un avantage important dans un environnement minier phosphaté où les conditions d'exploitation sont souvent sévères. Les tambours motorisés modernes peuvent atteindre des diamètres d'environ 800 mm, des puissances de l'ordre de 130 kW et un rendement pouvant aller jusqu'à 97%.

Intérêt pour Bled El Hadba :

Pour une mine comme Bled El Hadba, ce type de tambour présente un intérêt particulier lorsque l'on recherche une solution compacte, fiable et mieux protégée contre l'encrassement. Il peut contribuer à simplifier l'architecture du convoyeur, à réduire l'exposition des composants aux agressions extérieures et à améliorer la continuité du transport du phosphate.



Figure II.9 : Tambour motorisé.

II.8. Dispositifs de tension :

À la mine de **Bled El Hadba**, les dispositifs de tension servent à garder la bande bien tendue pendant le transport du phosphate. Ils évitent le patinage au tambour moteur, maintiennent la forme en auge de la bande et compensent l'allongement dû à l'usure et aux variations de charge. Ils aident aussi à garder la bande bien centrée et à réduire les efforts sur les épissures.

On peut résumer leur rôle par cette relation simple :

$$T1/T2 = e^{\mu\alpha}$$

Où **T1** est la tension du brin tendu, **T2** celle du brin mou, **μ** le coefficient de frottement et **α** l'angle d'enroulement.

La puissance transmise peut aussi s'écrire :

$$P = F \times v$$

Où P est la puissance, F la force et v la vitesse de la bande.

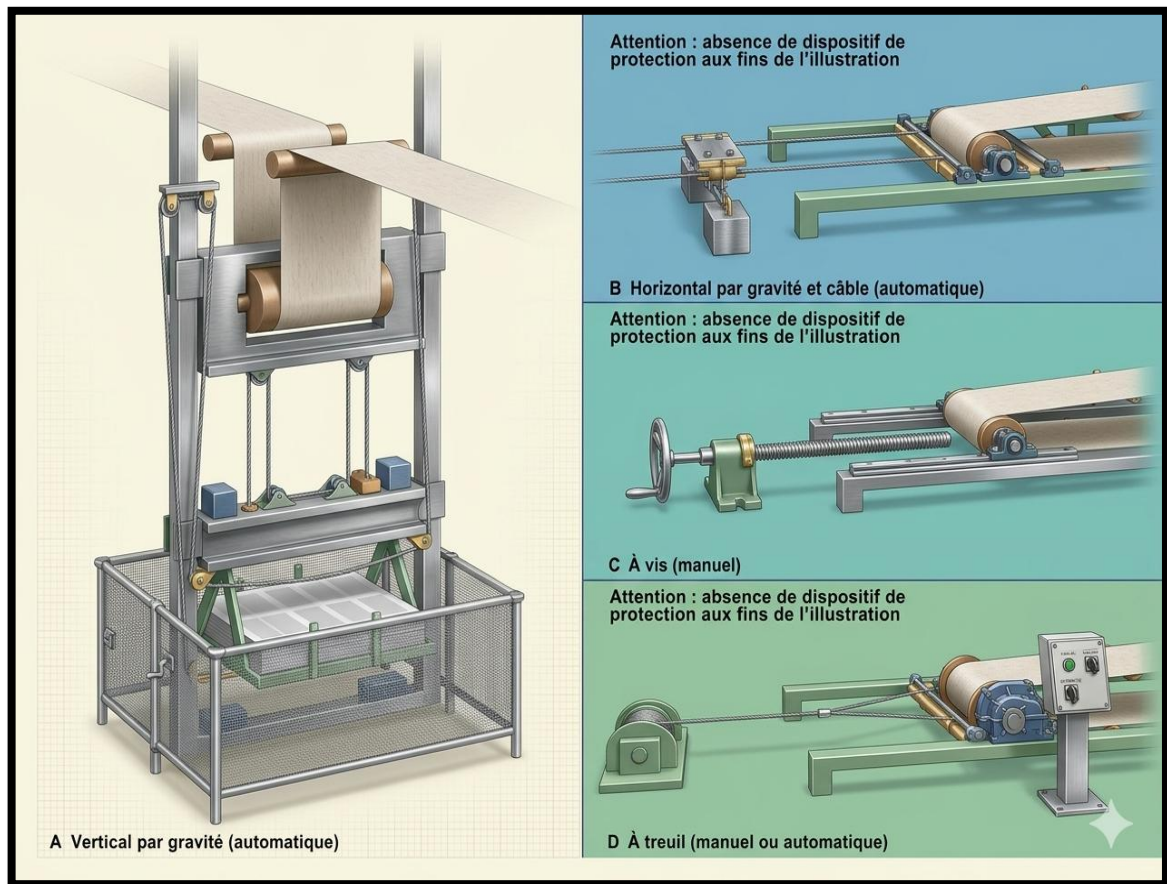


Figure II.10 : types de dispositifs de tension

II.9. Trémie d'alimentation :

À la mine de **Bled El Hadba**, la trémie d'alimentation est utilisée pour faciliter le chargement du phosphate vers le convoyeur. Elle permet de guider le produit, d'amortir les chocs au moment de la chute et de limiter les risques de colmatage ou d'endommagement de la bande. Son rôle est donc essentiel pour assurer une alimentation régulière et continue du convoyeur.

La conception de la trémie dépend des caractéristiques du phosphate de Bled El Hadba, notamment sa granulométrie, sa masse volumique, son humidité et son comportement à l'écoulement. L'inclinaison des parois doit être choisie de manière à favoriser le glissement du matériau et à éviter son accumulation. De plus, la vitesse du convoyeur et la trajectoire de chute du produit doivent être prises en compte pour garantir un chargement correct et stable.



Figure II.11 : Vues de trémie de chargement.

II.10. Dispositifs de nettoyage :

À la mine de **Bled El Hadba**, les dispositifs de nettoyage de la bande sont très importants pour assurer le bon fonctionnement du convoyeur. Ils servent à enlever les résidus de phosphate qui peuvent adhérer à la bande, surtout lorsque le matériau est humide ou collant. Un nettoyage efficace permet de réduire les arrêts de maintenance, de limiter l'usure de la bande et d'améliorer la productivité du transport.



Figure II.12 : Dispositifs de nettoyage.

II.11. Capot ou couvercle protecteur :

À la mine de **Bled El Hadba**, le capot ou couvercle protecteur peut être utilisé pour couvrir certaines parties du convoyeur afin de protéger le phosphate transporté contre les effets de l'air ambiant, de la poussière et des intempéries. Il contribue aussi à améliorer la sécurité et à limiter la dispersion du matériau pendant le transport, surtout dans les zones exposées.

Cependant, dans plusieurs mines algériennes, ce type de protection n'est pas toujours installé sur toute la longueur des convoyeurs, à cause des contraintes de coût, de maintenance et des conditions d'exploitation difficiles. Dans certains cas, les exploitations préfèrent garder les convoyeurs ouverts pour faciliter l'inspection, le nettoyage et l'accès rapide aux équipements. Ainsi, l'utilisation du capot dépend souvent des exigences du site et du niveau de protection recherché.



Figure II.13 Couvercle de protection.

II.12. Bande (courroie) :

À la mine de **Bled El Hadba**, la bande transporte le phosphate depuis la zone de chargement jusqu'au point de déchargement du convoyeur. Elle peut être plate ou en auge selon l'installation, et elle comporte deux faces : la face externe, en contact avec le minerai, et la face interne, en contact avec les rouleaux et les tambours.

Dans ce type de mine, la nature du phosphate peut provoquer une usure importante de la bande. En effet, le matériau transporté est souvent abrasif, parfois humide et chargé de fines particules, ce qui accélère l'érosion de la surface de la courroie. Avec le temps, cette agressivité du phosphate peut réduire la durée de vie de la bande et augmenter les besoins de maintenance.

Elle comporte également deux brins :

- Le brin supérieur, appelé aussi brin porteur.
- Le brin inférieur, appelé aussi brin de retour.

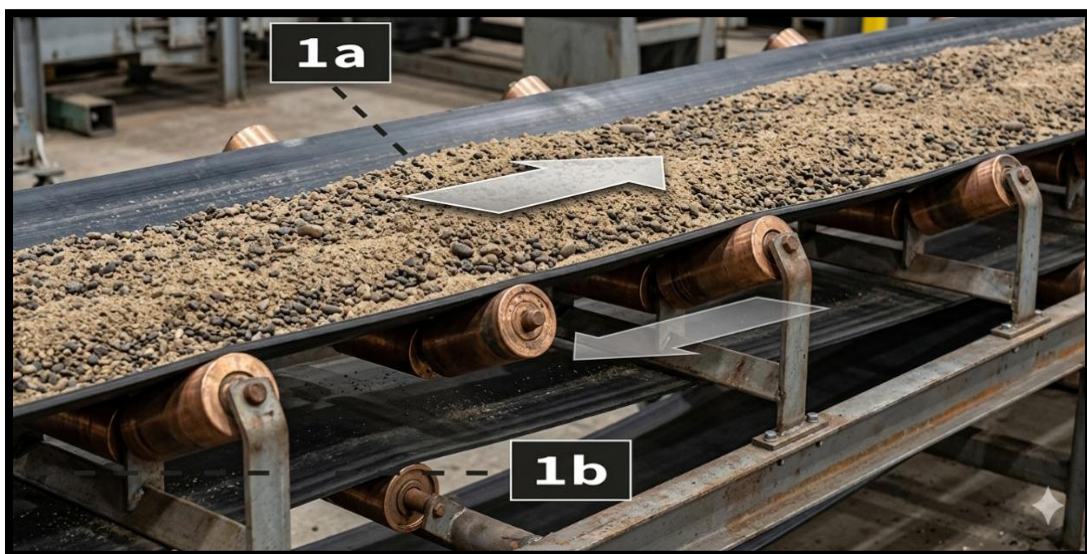


Figure II.14 types de supports de bande.

La bande transporteuse est généralement constituée d'une **carcasse** et de revêtements de protection placés sur les faces supérieure et inférieure, afin d'assurer la résistance mécanique et la protection contre l'usure. Dans les convoyeurs à bande, elle est considérée comme un élément de manutention sans fin, formé d'un ou de plusieurs tronçons assemblés à leurs

extrémités. Pour les bandes de faible longueur, la fabrication peut être réalisée directement sous forme sans fin.

On distingue plusieurs types de bandes :

- Bande en toile et caoutchouc.
- Bande en fibres naturelles ou synthétiques.
- Bande en acier.
- Bande à treillis métallique.

D'un point de vue structurel, le convoyeur à bande est l'un des moyens de transport les plus simples et les plus légers. Il peut fonctionner horizontalement, en pente, ou selon une combinaison de ces deux dispositions. Les configurations typiques du convoyeur à bande sont présentées dans les figures suivantes.

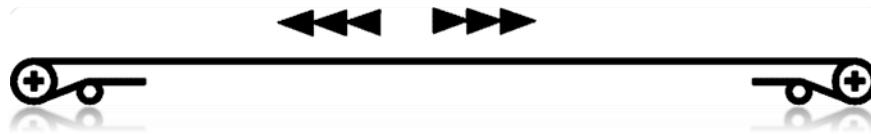


Figure II.15 Convoyeur à bande horizontale.



Figure II.16 Convoyeur à tronçons horizontal et incliné, pour lequel il est nécessaire d'utiliser deux bandes.



Figure II.17 Convoyeur à bande horizontale et tronçon incliné, où l'espace permet une courbe verticale et la charge ne nécessite qu'une seule bande.

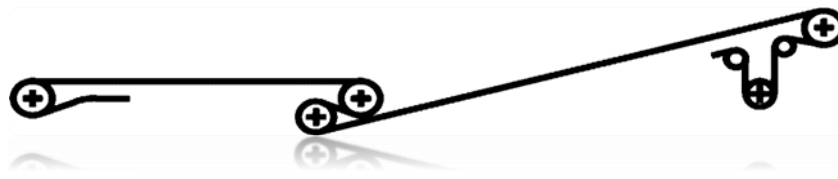


Figure II.18 Convoyeur à tronçons horizontal et incliné, où l'espace ne permet pas de réaliser une courbe verticale, mais la charge ne nécessite qu'une seule bande.



Figure II.19 Convoyeur à bande inclinée et tronçon horizontal, où la charge ne nécessite qu'une seule bande et l'espace permet une courbe verticale.



Figure II.20 Convoyeur à une seule bande comportant un tronçon horizontal, un tronçon incliné et un en descente avec des Courbes verticales.



Figure II.21 Convoyeur à tronçons horizontal et incliné, où l'espace ne permet pas de courbe verticale et la charge nécessite deux bandes.

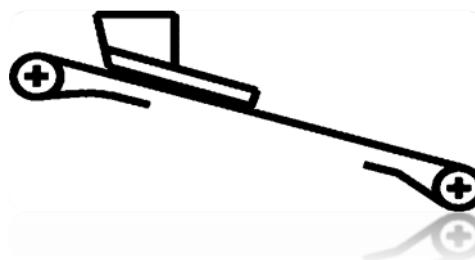


Figure II.22 Convoyeur dont la bande est chargée en pente ascendante ou descendante.

II.12.1. Caractéristiques et rôle de la bande transporteuse :

II.12.2. Composition et rôle :

À la mine de **Bled El Hadba**, la bande transporteuse constitue l'élément central du convoyeur à bande. Elle assure le transport continu du phosphate entre la zone d'extraction et la zone de stockage. Sa structure doit garantir une bonne résistance mécanique afin de supporter les charges importantes, les chocs au chargement et l'abrasion due à la nature du phosphate.

II.12.3. Principe de fonctionnement :

Le déplacement de la bande est assuré par le tambour moteur, qui entraîne l'ensemble du circuit en boucle fermée. Ce fonctionnement permet un transport régulier et continu du minerai sur une longue distance, ce qui est particulièrement adapté aux exigences de la mine de Bled El Hadba.

II.12.4. Caractéristiques principales :

La bande doit présenter une forte résistance à l'usure, une bonne flexibilité et une stabilité dimensionnelle satisfaisante. Dans le cas de Bled El Hadba, ces propriétés sont essentielles, car le phosphate est un matériau abrasif qui peut accélérer la dégradation de la courroie. Le choix de la bande dépend donc des conditions d'exploitation, de la charge transportée et de la distance à parcourir.

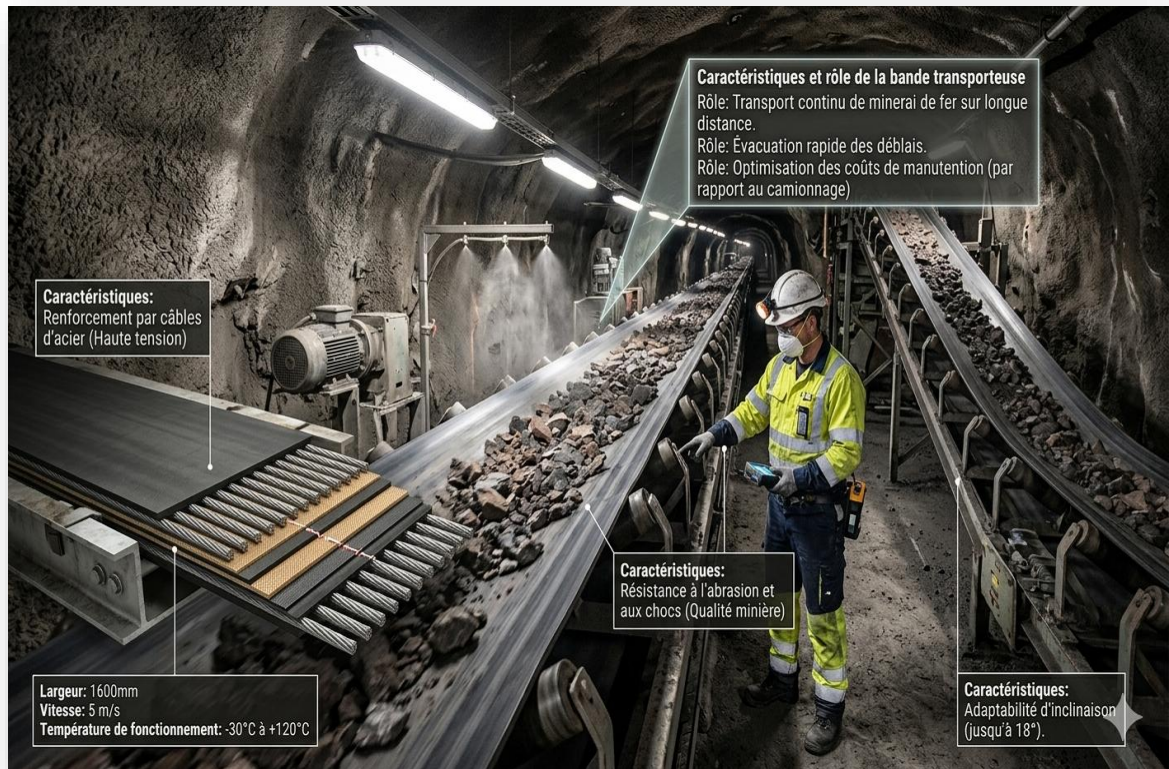


Figure II.23 Caractéristiques et rôle de la bande transporteuse en mine

➤ **Relation de base :**

La puissance nécessaire au transport peut être estimée par la relation :

$$P=F \times V$$

Où :

- **P** est la puissance,
- **F** est l'effort de traction,
- **V** est la vitesse de la bande.

Cette relation montre que plus la charge ou la vitesse augmente, plus la puissance demandée au système devient importante. Dans une mine comme Bled El Hadba, cela impose une conception rigoureuse du convoyeur afin d'assurer un fonctionnement stable et durable.

II.13. Stations porteuses en auge :

À la mine de **Bled El Hadba**, les stations porteuses en auge servent à soutenir la bande et à maintenir sa forme en auge pendant le transport du phosphate. Les rouleaux porteurs sont généralement fixés sur des supports soudés à une traverse ou à une structure métallique. L'angle d'inclinaison des rouleaux latéraux varie en général entre 20° et 45° , ce qui permet de mieux contenir le matériau transporté et de limiter les pertes sur les côtés.



Figure II.24 Fixation des rouleaux sur la station-support

➤ **Stations supports inférieures :**

Aussi appelées **stations du brin de retour**, elles peuvent être constituées d'un seul rouleau sur toute la largeur de la bande, ou de deux rouleaux disposés en forme de « V » et inclinés d'environ 10° , comme le montre la figure II.24.



Figure II.25 Rouleaux porteurs inférieurs

II.14. Stations de transfert intermédiaires :

II.14.1. Rôle dans la mine de Bled El Hadba :

Dans la mine de **Bled El Hadba**, les stations de transfert intermédiaires sont utilisées pour répartir le transport du phosphate sur plusieurs tronçons lorsque la distance est importante. Elles assurent un passage régulier du minerai entre la zone d'extraction et la zone de stockage, tout en maintenant la continuité de l'acheminement.

II.14.2. Fonctionnement et besoins :

Ces stations consomment de l'énergie afin de permettre le transfert du matériau et le bon déroulement du transport. Cette consommation dépend notamment de la longueur du trajet, de la quantité de matière transportée et de la configuration générale de l'installation. Elles nécessitent également un nettoyage régulier pour éviter l'accumulation de poussières et de résidus de phosphate, ce qui permet de préserver leur bon fonctionnement.

II.14.3. Entretien :

Du fait de leur utilisation continue, ces stations subissent une usure progressive et demandent un remplacement fréquent de certaines pièces de rechange, en particulier les éléments

mécaniques les plus sollicités. Dans le contexte de la mine de **Bled El Hadba**, cela impose un suivi technique régulier afin d'assurer la fiabilité et la continuité du système de transport.



Figure II.26 Stations de transfert intermédiaires

II.15. Conclusion :

Avant d'entreprendre le choix ou la conception d'un convoyeur à bande destiné à la mine de **Bled El Hadba**, il est indispensable de mener une étude bibliographique approfondie afin de maîtriser ses caractéristiques techniques, ses principaux organes de construction et ses

domaines d'utilisation. Cette étape permet de mieux comprendre le fonctionnement du convoyeur dans les conditions spécifiques d'exploitation de la mine, notamment la nature abrasive du phosphate, les contraintes de transport et les exigences de continuité de service.

Cette connaissance constitue une base essentielle pour assurer un dimensionnement correct de l'installation, garantir la durabilité des composants et réduire les risques de défaillance ou d'usure prématurée. Elle contribue également à améliorer le rendement global du système, à maintenir un fonctionnement stable et efficace, et à assurer de bonnes conditions de sécurité et de travail sur le site de Bled El Hadba.

Enfin, après l'étude de cette solution de transport classique, il devient pertinent d'aborder une autre technologie de manutention minière, à savoir le **RAILVEYOR**, qui fera l'objet du chapitre suivant. Cette transition nous permet d'aborder le chapitre 03, consacré au railveyor, que nous allons étudier de la même manière que le convoyeur à bande, à travers son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et son rôle dans le transport minier.

CHAPITRE III

La Technologie

Rail-Veyor

III.1. Introduction :

Le transport du minerais et des stériles représente l'un des sous-systèmes les plus coûteux et les plus énergivores de toute exploitation minière. Dans les mines à ciel ouvert comme dans les mines souterraines, le transport conventionnel par camions représente généralement 30 à 50 % du coût opérationnel total et constitue la principale source de consommation de gazole, d'émissions de gaz à effet de serre et d'exposition du personnel aux risques professionnels. La demande croissante d'alternatives plus sûres, plus propres et plus économiques a stimulé le développement de technologies de transport continu, parmi lesquelles le système **Rail-Veyor®** — breveté et commercialisé par Rail-Veyor Technologies Global Inc. (Sudbury, Ontario, Canada) — se distingue comme l'une des solutions les plus innovantes des deux dernières décennies.

Le Rail-Veyor est un système de transport de matériaux en vrac entièrement automatisé, sur rail léger et à propulsion électrique. Il combine la capacité de charge d'un chemin de fer avec les caractéristiques d'écoulement continu d'une bande transporteuse, tout en ne nécessitant qu'une fraction de l'infrastructure de génie civil requise par l'un ou l'autre. Dans le cadre du présent Projet de Fin d'Études, ce chapitre présente une description technique, opérationnelle, environnementale et économique complète du système Rail-Veyor, en préparation de son application conceptuelle au gisement de phosphate de Bled El Hadba exploité par Ferphos / SOMIPHOS à Bir El Ater (Wilaya de Tébessa, Algérie).



Figure III.1 : Machine de Rail-Veyor

III.2. Développement historique :

Le concept Rail-Veyor a été développé pour la première fois en **1999** en réponse à la demande de l'industrie pour une alternative plus légère et plus flexible aux bandes transporteuses et au transport ferroviaire. Sa maturation industrielle a suivi une séquence progressive d'installations à grande échelle sur le terrain, résumée dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Jalons industriels du système Rail-Veyor 1999-2021.

Année	Jalon	Lieu / Exploitant
1999	Premier prototype Rail-Veyor R V) développé	Canada
Mi-2007	Première installation souterraine	Harmony Gold, Afrique du Sud
Mi-2012	Déploiement de la 2 ^e génération R V	Vale S.A., Copper Cliff, Canada
Fin 2013	Record mondial d'avancement de mine souterraine	Vale S.A.
2015	Finalisation de la conception R V de 3 ^e génération	—
2016 - Mi-2017	Contrat et mise en service	Agnico Eagle, Québec, Canada
2017 - 2021	Contrat et installation	MAROIL Trading, Venezuela
2018 - Mi-2019	Contrat et mise en service	Doe Run, Missouri, États-Unis
2019	Contrat attribué	Monarch Gold, Canada
2019 - 2021	Contrat et installation	Kazzinc, Kazakhstan

La version commerciale actuelle correspond à la **5^e génération** du matériel roulant, avec une masse à vide de 470 kg par wagon.

III.3. Déploiement mondial :

En 2021, des systèmes Rail-Veyor étaient en exploitation ou en cours d'installation dans cinq pays répartis sur quatre continents — le Canada et les États-Unis en Amérique du Nord, le Venezuela en Amérique du Sud, l'Afrique du Sud en Afrique et le Kazakhstan en Asie centrale. Cette empreinte internationale démontre l'adaptabilité de la technologie à une

grande variété de contextes miniers (or, cuivre-nickel, plomb-zinc, sables bitumineux, minerais polymétalliques) ainsi qu'aux exploitations en surface comme en souterrain.

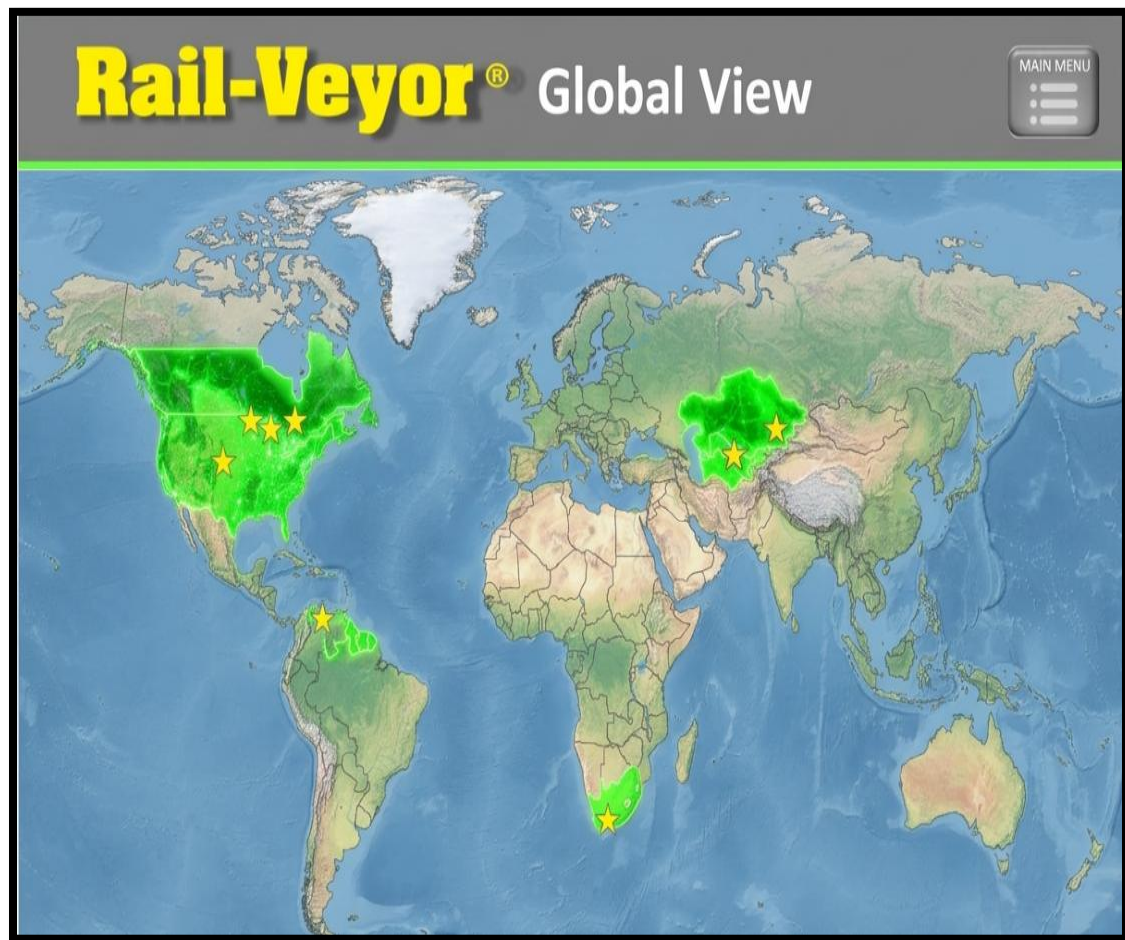


Figure III.2 : Aperçu global de l'utilisation du Rail-Veyor

III.4. Système Rail-Veyor — Matériel :

Le système Rail-Veyor est construit autour de quatre familles de composants matériels :

Les wagons, les stations d'entraînement, la voie et les traverses, et les équipements périphériques de chargement/déchargement. Ensemble, ils constituent un train continu de wagons-auges ouverts à profil bas, propulsés par des entraînements latéraux fixes.

III.4.1. Wagons :

Chaque wagon est une auge basse en forme de U, ouverte, montée sur un bogie léger. Deux tailles standard sont produites :

- **Largeur d'auge standard de 30 en (765 mm)** — accepte des granulométries jusqu'à ≈ 24 in (610 mm).
- **Largeur d'auge optionnelle de 48 en (1 222 mm)** — accepte des granulométries jusqu'à ≈ 36 in (914 mm).

Le wagon 30 in de 5^e génération présente une masse à vide de **470 kg**. Les wagons sont accouplés mécaniquement en un train continu, sans locomotive ni moteur embarqué. La matière est contenue entre les wagons adjacents par chevauchement des lèvres d'auge, formant une charge quasi continue sur toute la longueur du train.



Figure III.3 : Wagon de Rail-Veyor Standard 30" (.765m)

Calcule de capacité d'un wagon :

- Nous savons que Le Volume du cylindre égal :

$$V_{ey} = \pi r^2 \times l \text{ En m}^3$$

Avec :

πr^2 : est l'aire de la base (se forme d'un disque d'aire) en m^2

L : est la longueur en m

Et nous avons Le wagon de rail-veyor se forme d'un demi cylindre en Horizontale

Alors on remplacer par $r/2$ donc :

$$V_{\text{wagon}} = \pi (r/2)^2 \times l \text{ m}^3$$

Avec :

$$r : 1.2 \text{ m}$$

$$l : \text{Longueur du wagon: } 2.4 \text{ m}$$

$$V_{\text{wagon}} = 3.14 \times (1.2/2)^2 \times 2.4 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{wagon}} = 2.71 \text{ m}^3$$

• **Capacité réelle d'un wagon :**

$$C_{\text{wagon}} (\text{tonne}) = (V_{\text{wagon}} \times K_r \times d) / K_f \quad \text{en tonne}$$

Avec :

$$K_r : \text{Coefficient de remplissage d'un wagon : } 1.20$$

$$d : \text{Densité de fer : } 2.7$$

$$K_f : \text{Coefficient de foisonnement : } 1.5$$

• **Application numérique :**

$$C_{\text{wagon}} = 2.71 \times 1.2 \times 2.7 / 1.5$$

$$C_{\text{wagon}} = 5.85 \text{ tonne}$$

III.4.2. Stations d'entraînement :

La propulsion est assurée par des **stations d'entraînement latérales fixes** installées à intervalles réguliers le long de la voie. Chaque station d'entraînement comprend deux paires opposées de pneus en caoutchouc entraînés par moteur électrique, qui pincent une plaque d'entraînement verticale située sur le côté de chaque wagon lors de son passage. Leurs principales caractéristiques sont :

- **Aucune fondation en béton requise** — les stations d'entraînement sont boulonnées sur les traverses métalliques de la voie.
- **Fonctionnement à la demande** — une station d'entraînement ne fonctionne que lorsqu'un train se trouve dans sa zone, réduisant la consommation en attente à pratiquement zéro.

- **Freinage régénératif** — en descente, les moteurs des stations d'entraînement fonctionnent comme générateurs, restituant l'énergie électrique au réseau.
- **Aucun stockage d'énergie embarqué** — élimine la gestion de batteries, le risque d'incendie et la nécessité de caténaires ou de fils trolley.



Figure III.4 : Stations d'entraînement

III.4.3. Voie et traverses :

La voie Rail-Veyor se compose de rails légers en acier de 30 lb/yd ou 40 lb/yd serrés sur des **traverses en tôle emboutie**, posées sur une fine couche (quelques centimètres) de granulats concassés. L'empreinte totale de la voie n'exerce qu'une pression au sol de **8 lbf/in² ($\approx$ 55 kPa)** — environ un dixième de celle d'un itinéraire ferroviaire lourd ou de transport par camion conventionnel.

Ce support léger offre trois avantages pratiques par rapport aux alternatives ferroviaires lourdes et par bande :

Pas de traverses en bois, pas de sous-couche de ballast — l'installation se réduit au nivellement, à la pose des granulats et au boulonnage de panneaux préassemblés.

Mobilité — les sections de voie peuvent être déboulonnées, soulevées et déplacées au fur et à mesure de l'avancement des fronts d'exploitation, ce qui est essentiel pour une mine à ciel ouvert en extension ou un creusement en avancée.

Réutilisation de l'infrastructure existante — la voie peut être posée le long des pistes de camions existantes, des rampes de descente, des galeries minières ou des fonds de carrière avec une préparation minimale.

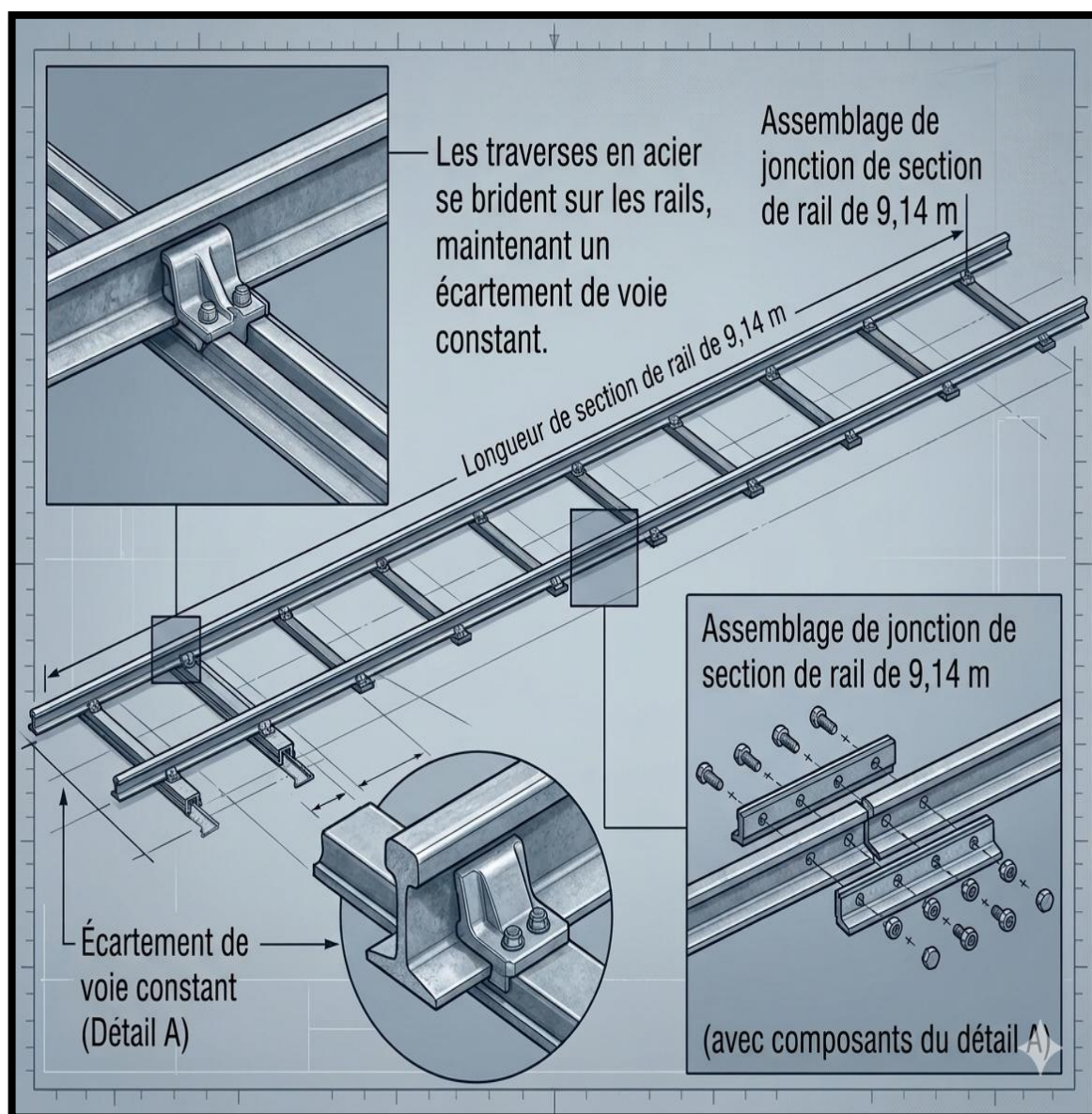


Figure III.5 : Détails de conception de la voie Rail-Veyor, assemblages et géométrie.

III.4.4. Configurations de train :

Trois topologies fondamentales de voie sont prises en charge, comme indiqué dans le **Tableau III.2**. Le choix de la configuration est un paramètre essentiel, car il conditionne le débit maximal, la distance de transport, la stabilité du convoi et la répartition des efforts mécaniques. Cette configuration doit donc être adaptée à la géométrie du site et aux contraintes d'exploitation afin de garantir un fonctionnement stable, sûr et performant.

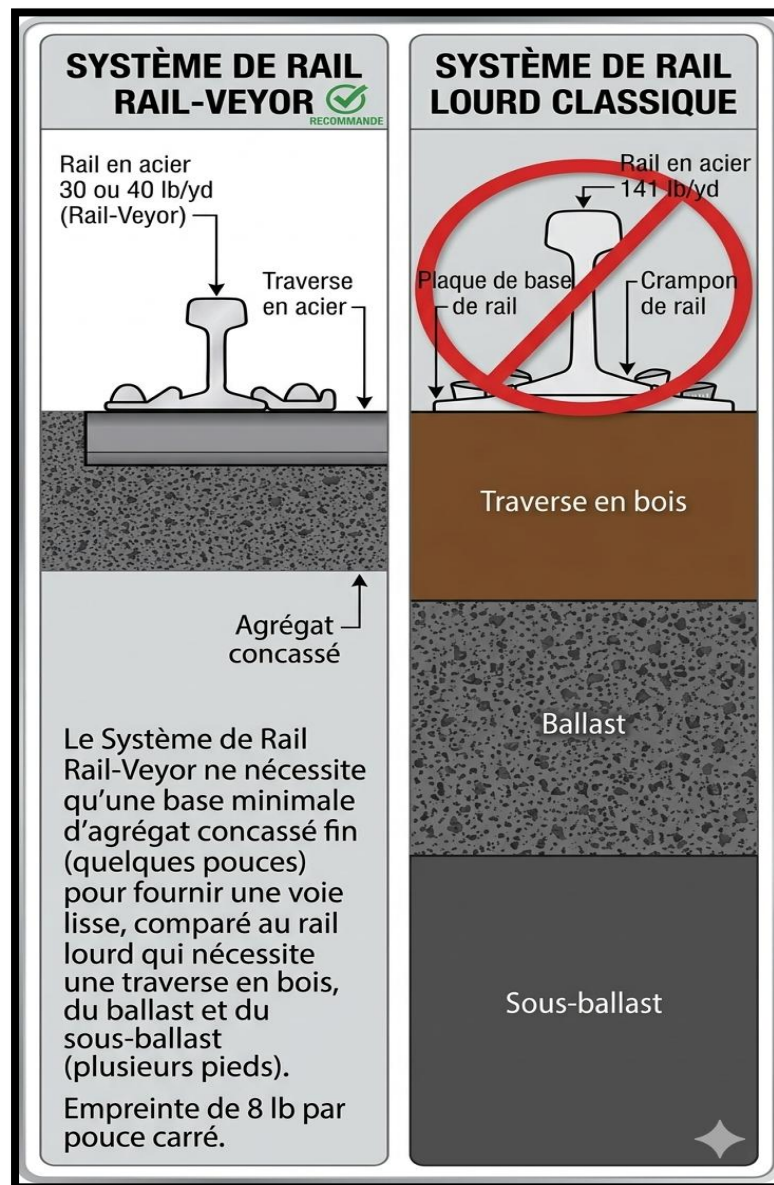


Figure III.6 : Comparaison des exigences de fondation et de structure entre le Rail-Veyor et le rail lourd classique.

Tableau III.2 : Configurations de voie Rail-Veyor.

Configuration	Principe	Débit / distance
Navette	Un seul train fait des allers-retours sur une voie unique entre points de chargement et de déchargement fixes.	Le plus faible
Navette avec voies d'évitement	Deux trains ou plus partagent une voie unique, se croisant aux voies d'évitement.	Intermédiaire
Boucle	Plusieurs trains circulent en continu sur une boucle fermée entre un point de chargement et un point de déchargement.	Le plus élevé (tonnage et distance)

III.4.5. Lignes directrices géométriques (courbure et pente) :

La flexibilité géométrique du Rail-Veyor est l'une de ses caractéristiques distinctives. Les rayons de courbure minimaux sont résumés dans le **Tableau III.3**.

Tableau III.3 : Rayons de courbure minimaux.

Longueur du wagon	Largeur d'auge	Rayon de courbure minimal
1,5 m (5 ft)	765 mm (30 in)	20 m (66 ft)
2,4 m (8 ft)	765 mm (30 in)	30 m (100 ft)
2,4 m (8 ft)	1 222 mm (48 in)	35 m (115 ft)

Le système fonctionne également sur des **pentés allant jusqu'à 30 %** — valeur largement supérieure aux capacités des bandes transporteuses conventionnelles (généralement limitées à 16 18 %) et des camions-bennes à châssis rigide (généralement ≤ 10 12 %). Combinée à une courbure serrée, cette capacité de franchissement de pente rend le Rail-Veyor particulièrement adapté aux itinéraires souterrains compacts et sinueux, ainsi qu'aux rampes d'accès inclinées des exploitations de phosphate à ciel ouvert telles que Bled El Hadba.

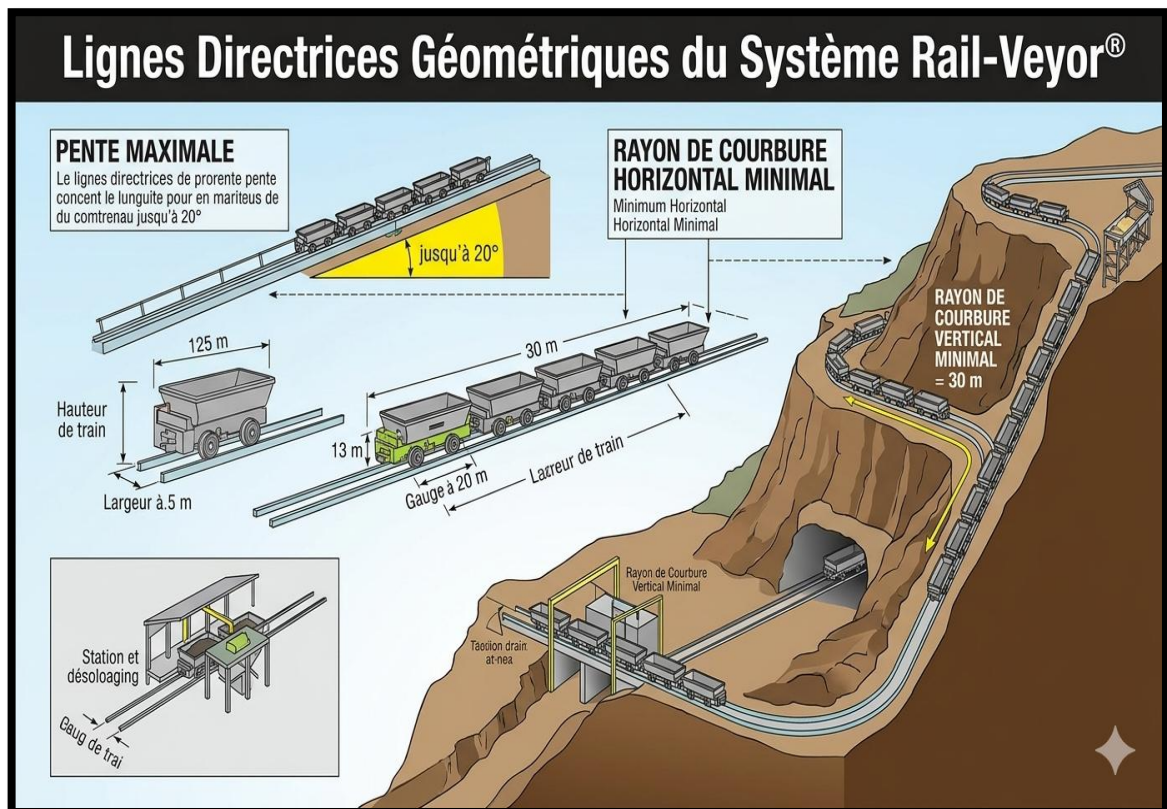


Figure III.7 : Lignes directrices Géométriques du système Rail-Veyor.

III.5. Système Rail-Veyor — Automatisation :

Le Rail-Veyor est un système **TrulyAutonomous™** : il n'y a pas de conducteur à bord, et l'ensemble du parc est supervisé depuis une interface Homme-Machine (IHM) unique. L'architecture de commande comprend :

- Une couche centrale d'automate programmable (PLC) et de SCADA qui planifie, dispatche et surveille chaque train en temps réel.

Des capteurs en bord de voie (étiquettes RFID, détecteurs de proximité, codeurs) qui localisent en continu chaque train à une fraction de la longueur d'un wagon près.

- Des variateurs de fréquence (VFD) à chaque station d'entraînement, qui reçoivent individuellement des consignes de vitesse afin que le chargement, la montée de rampe, la descente de rampe et le déchargement s'effectuent chacun à leur vitesse optimale.
- Des IHM sur tablette et sur poste de travail qui affichent, pour chaque train : la vitesse, la position, le temps de cycle, la puissance instantanée et la consommation totale d'énergie.

- Trois niveaux d'alerte progressifs pour toute anomalie détectée, permettant une dégradation maîtrisée plutôt que des arrêts d'urgence dans la majorité des incidents.

Du point de vue du génie électromécanique, le système constitue donc un **réseau d'entraînement distribué, riche en capteurs et régénératif** — une configuration directement alignée sur les paradigmes Industrie 4.0 et mine autonome qui orientent de plus en plus les décisions d'investissement dans le secteur minier mondial.

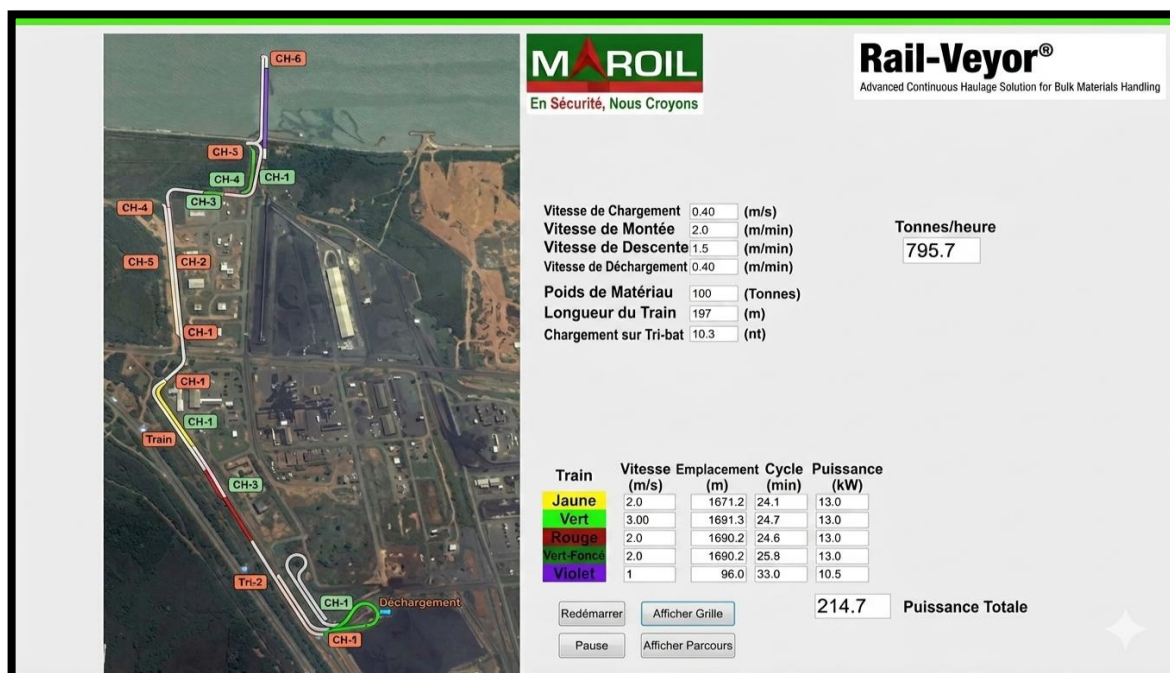


Figure III.8 : Système de contrôle de commande et de supervision centralisée

III.6. Options de chargement :

Comme le train circule en continu à travers le point de chargement, le Rail-Veyor accepte une large gamme de dispositifs d'alimentation en amont :

- **Trémie / goulotte aérienne** : la configuration la plus simple, adaptée au minerai concassé à écoulement libre.
- **Alimentateur à plaque (apron feeder)** : assure un chargement contrôlé et dosé depuis un point de soutirage ou un stock.
- **Alimentateur de reprise** : utilisé dans les configurations souterraines de reprise depuis un stock (comme démontré à l'installation de Doe Run, Missouri).

- **Convoyeur de décharge** : alimente directement le Rail-Veyor depuis un concasseur ou un convoyeur en amont.

Le taux de chargement et la vitesse du train sont synchronisés par le système de commande de sorte que chaque wagon soit rempli à sa charge utile nominale sans débordement. Une fois le chargement terminé, la vitesse de roulement est automatiquement augmentée pour le tronçon de transport, maximisant le débit.

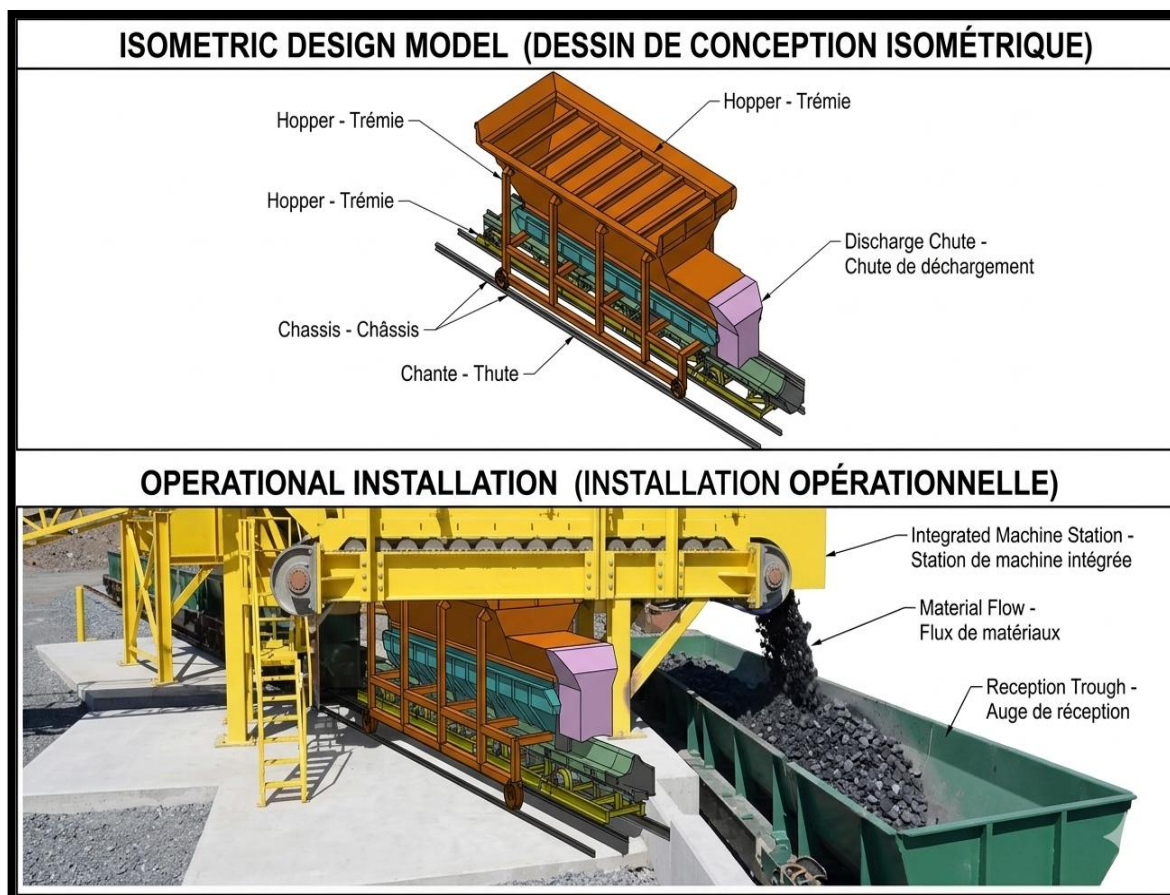


Figure III.9 : Conception isométrique et installation opérationnelle d'une station de chargement Rail-Veyor

III.7. Options périphériques — Déchargement :

Le déchargement est obtenu en **renversant le train sur une boucle de déchargement** : les rails effectuent une rotation de 180° de sorte que chaque wagon se retourne et déverse sa charge par gravité, puis revient à la position droite pour le trajet de retour. Quatre dispositifs de déchargement standard sont proposés :

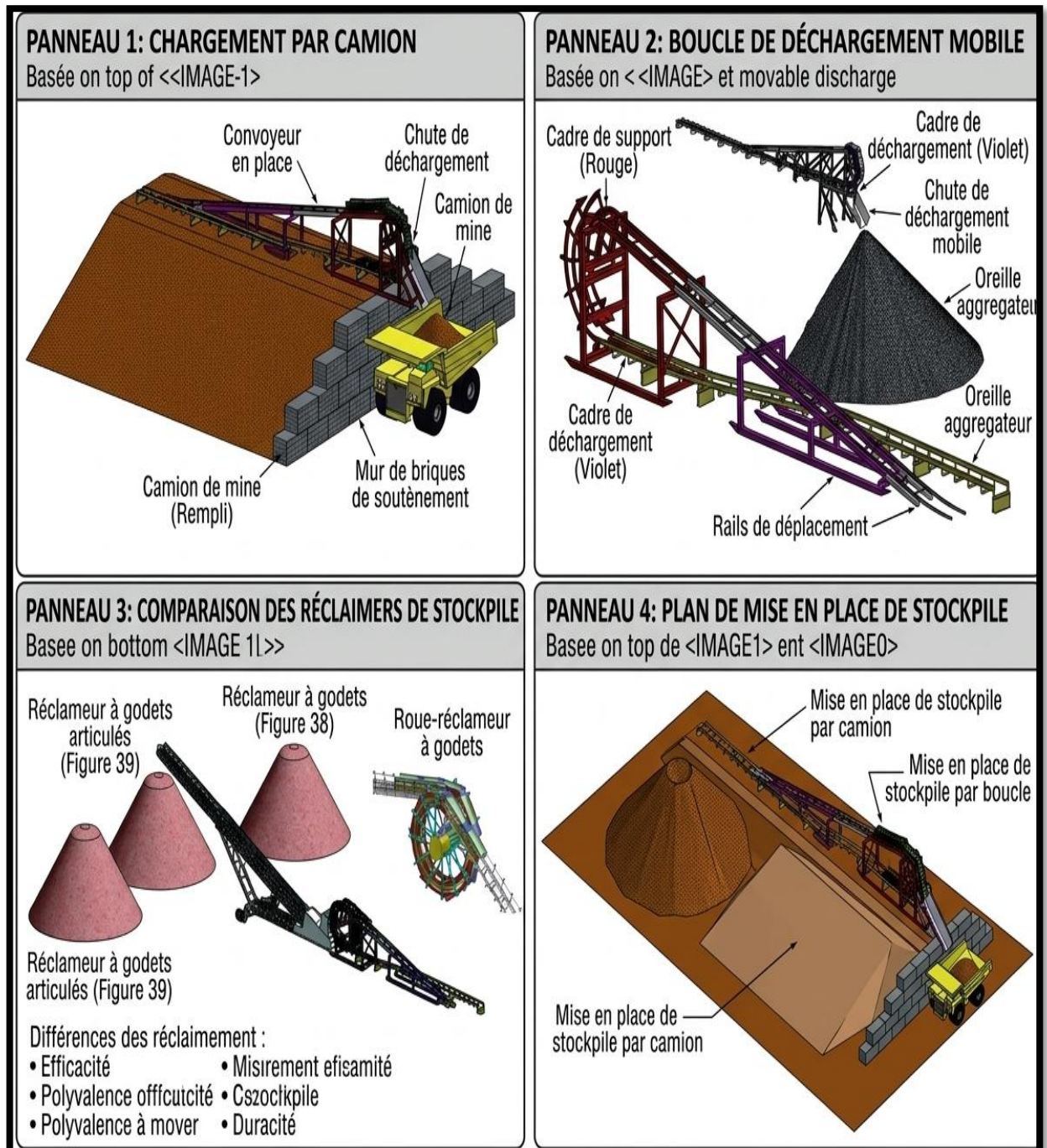
Boucle de déchargement fixe : décharge sur un stock ou une trémie à un point permanent.

Boucle de déchargement mobile : la boucle elle-même est montée sur patins et peut être repositionnée au fur et à mesure que le stock progresse.

Déchargement sur camion : la boucle décharge directement dans une benne de camion ou dans une remorque routière.

Boucle de déchargement à 360° / déchargement vers stackeur : un convoyeur stackeur étend le rayon de déchargement autour d'un pivot central pour une mise en stock radiale.

Le choix du dispositif de déchargement est dicté par le procédé en aval — concasseur primaire, stock, silo de chargement ferroviaire ou unité de lavage — ainsi que par les contraintes géométriques de la zone réceptrice.



FigureIII.10 : Aperçu des processus de stockage, incluant le chargement par camion, la boucle de déchargement mobile et les méthodes de reclaimage.

III.8. Rayon de courbure et contraintes géométriques :

Le dimensionnement géométrique du système Rail-Veyor constitue un paramètre essentiel dans son intégration au sein de la mine de **Bled El Hadba**. En effet, le tracé de la voie doit respecter un rayon de courbure minimal afin de garantir la stabilité du train, de limiter les efforts latéraux sur les wagons et d'assurer un fonctionnement continu et sécurisé du

système. Ainsi, le rayon de courbure n'est pas seulement une donnée de géométrie, mais également un critère mécanique déterminant dans la conception de la ligne.

D'après les données fournies, le Rail-Veyor impose des rayons minimaux différents selon la configuration du wagon et de la goulotte de chargement. Pour une **longueur de wagon de 1,5 m**, le rayon minimal de courbure est de **20 m**. Pour une **longueur de wagon de 2,4 m** avec une **largeur de goulotte de 765 mm**, le rayon minimal atteint **30 m**. Enfin, pour une **longueur de wagon de 2,4 m** avec une **largeur de goulotte de 1,2 m**, le rayon minimal exigé est de **35 m**. Ces valeurs montrent que plus les dimensions du wagon et de la goulotte augmentent, plus le rayon de courbure nécessaire devient important.

Dans le contexte de la mine de **Bled El Hadba**, où les distances de transport sont importantes et où le tracé doit être adapté aux contraintes du terrain, ce critère doit être pris en considération dès la phase de conception. Le respect de ces rayons minimaux permet de réduire les contraintes mécaniques, d'améliorer la stabilité du matériel roulant et de renforcer la fiabilité globale du système Rail-Veyor.

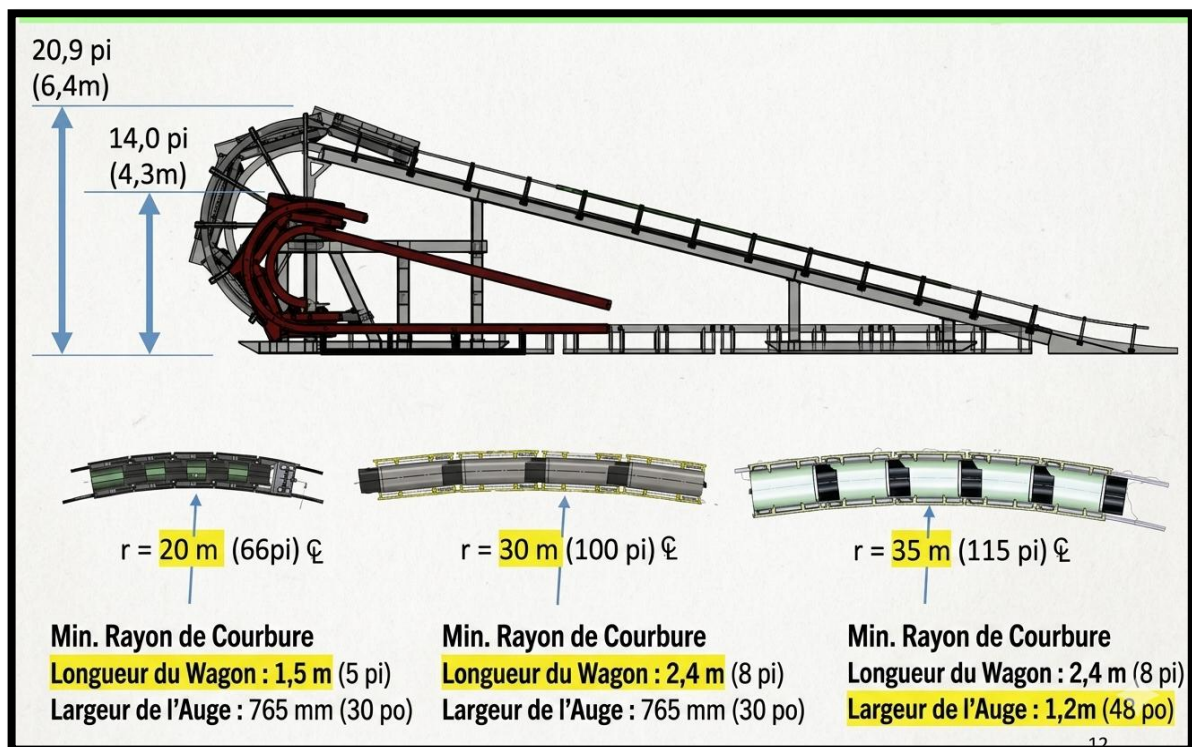


Figure III.11 : Spécifications géométriques du Rail-Veyor : encombrement de la boucle et rayons de courbure minimaux.

III.9. Maintenance :

La philosophie de maintenance du Rail-Veyor se résume en une seule formule issue de la documentation du fabricant : maintenance basée sur l'inspection, sans révision à mi- vie. Les principales caractéristiques sont :

- **Composants à durée de vie projet** — essieux, pneus d'entraînement et éléments structurels sont dimensionnés pour la durée de vie totale du projet.
- **Stations d'entraînement modulaires** — une station d'entraînement défaillante peut être contournée par le système de commande pendant que le train continue de fonctionner, puis remplacée lors d'un arrêt programmé.
- **Procédures de maintenance préétablies** — chaque système est livré avec un manuel de maintenance spécifique au site précisant les intervalles d'inspection et les procédures pas à pas.
- **Empreinte en main-d'œuvre réduite** — l'absence de moteur embarqué, de circuit de gazole, de transmission et d'opérateur fait que la charge de maintenance mécanique par tonne transportée représente une faible fraction de celle d'un parc de camions comparable.

Pour une exploitation de phosphate comme Bled El Hadba, où l'environnement corrosif et poussiéreux est sévère pour les camions-bennes conventionnels, la nature tout-électrique, étanche, à faible nombre de composants du Rail-Veyor devrait produire une réduction Substantielle des arrêts non planifiés.



Figure III.12 : opérations de maintenance et inspection technique d'une unité de propulsion Rail-Veyor en environnement souterrain.

Le schéma technique:

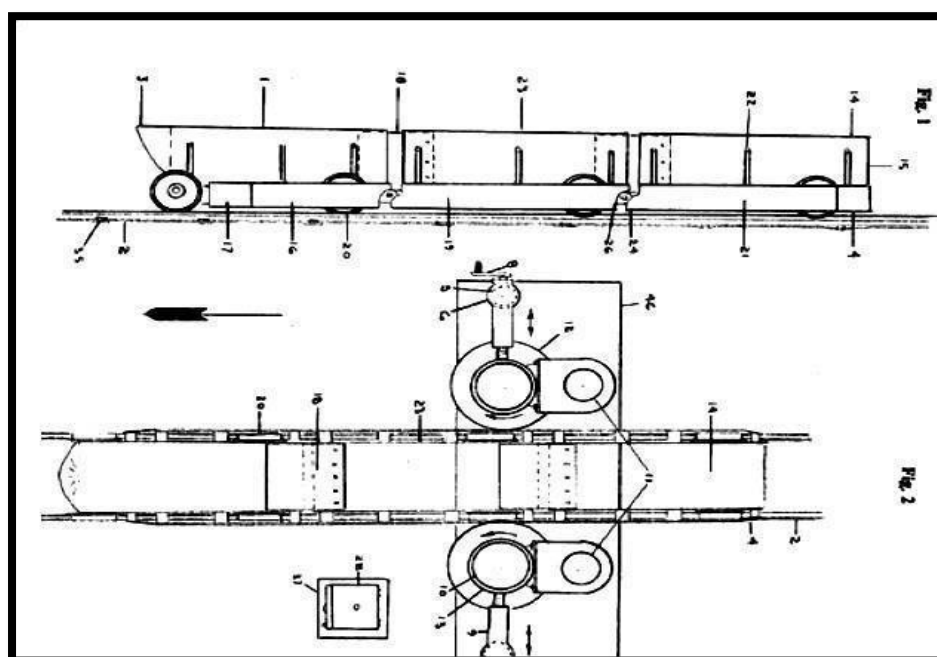


Fig. III.13 : vu de gauche et vu de dessus de Rail Veyor

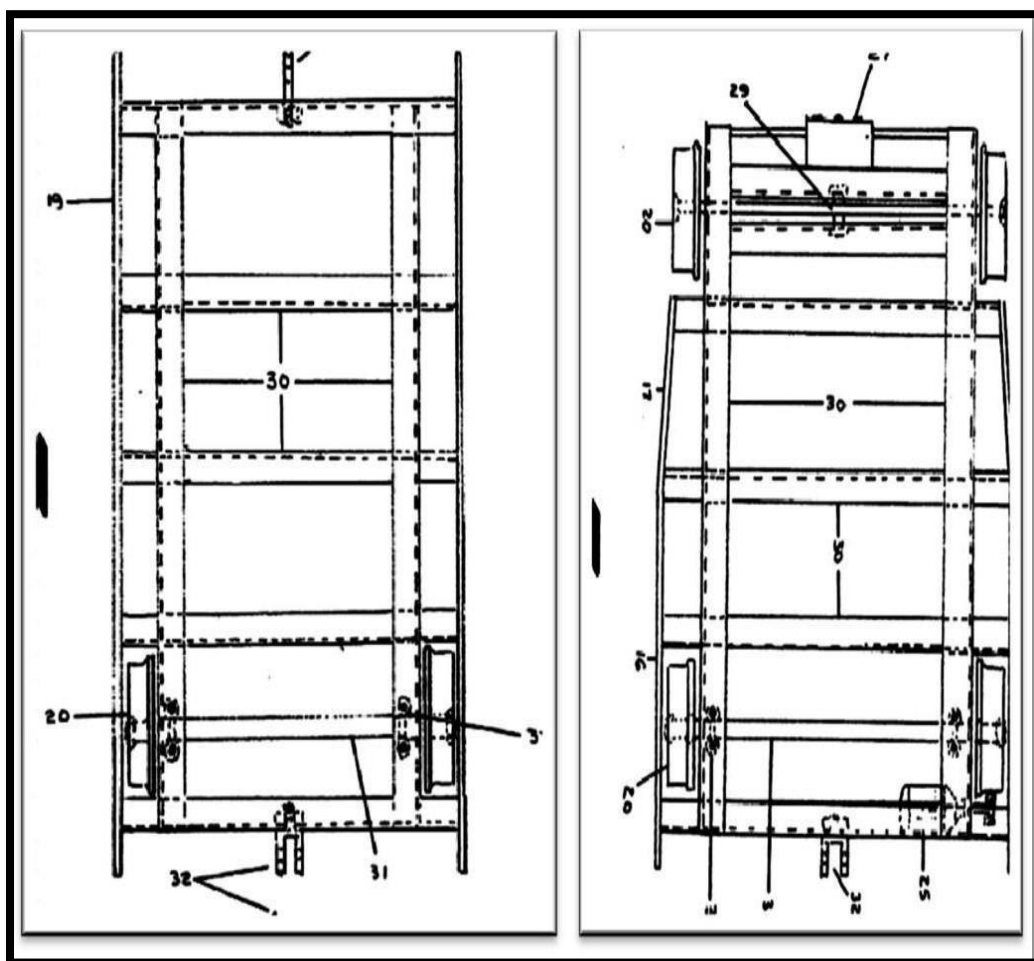


Fig. III. 14 : Vues de face et de côté du système Rail-Veyor

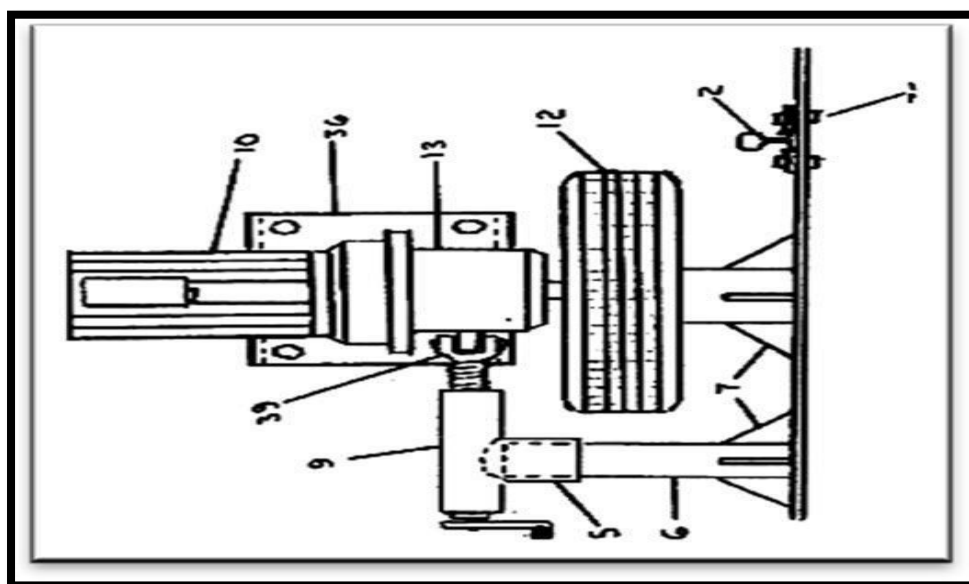


Fig. III. 15 : vu de gouache vu de dessus de station de commande

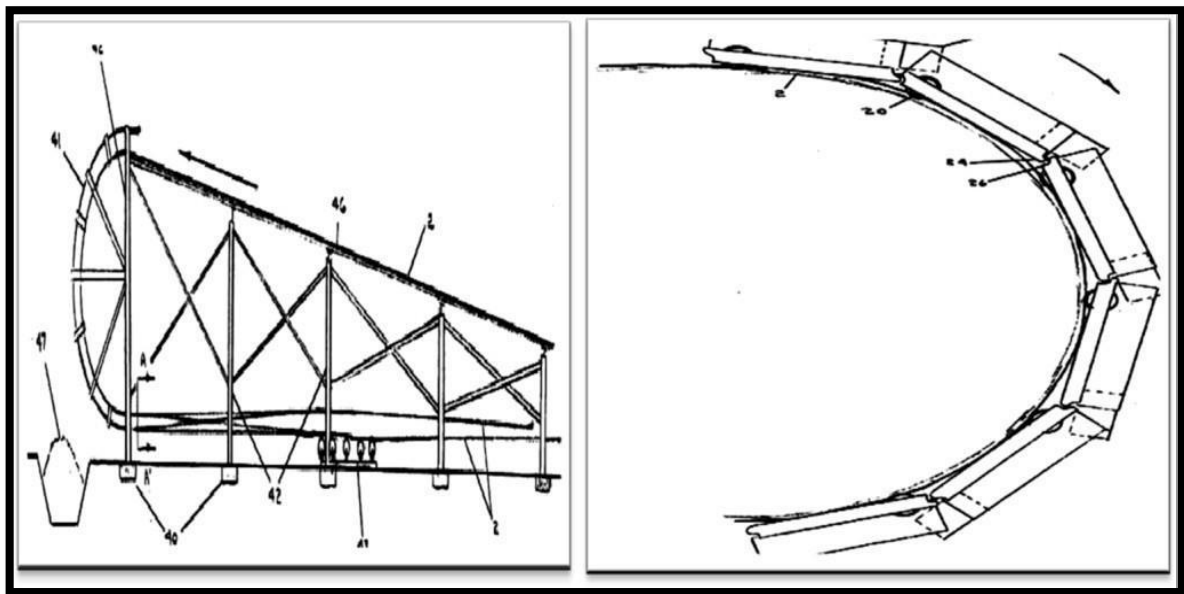


Fig. III.16 : Vu de gauche de déchargement de Rail Voyeur

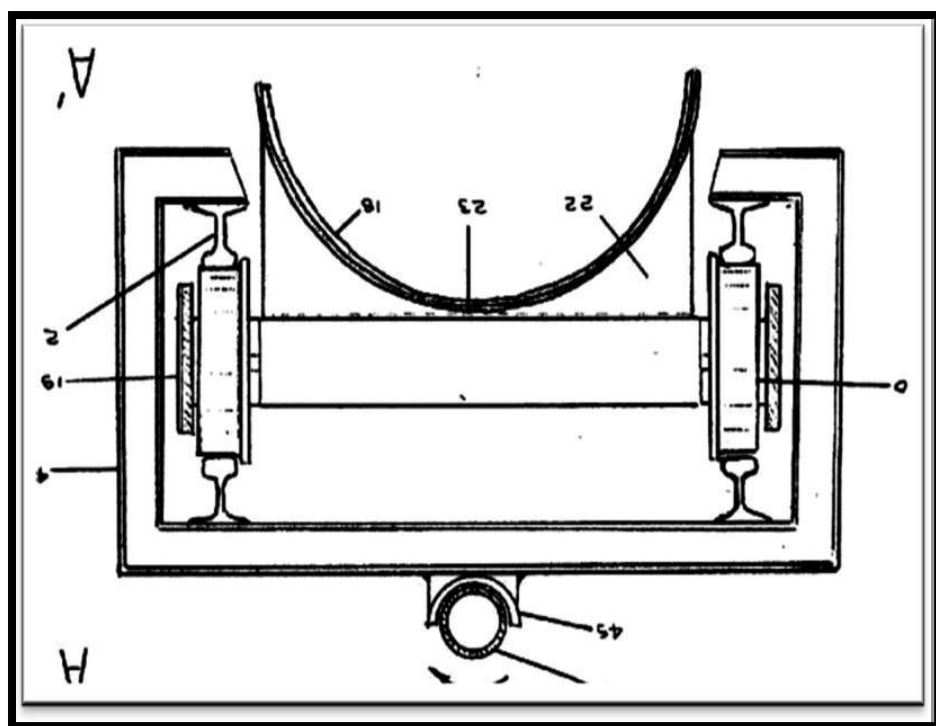


Fig. III.17 : Coupe longitudinale du chariot

1. Wagon de tête dans la courbe
2. Voie ferrée légère
3. Chute de déchargement du wagon avant
4. Cône arrière de la plaque d'entraînement du wagon
5. Poteau de support pour le mécanisme à vis-jack

6. Vis-jack
7. Supports verticaux du poteau
8. Poignée mécanique de commande de la vis-jack
9. Boîtier de la vis-jack
10. Unité d'entraînement à moteur électrique
11. Poteau pivotant pour l'unité d'entraînement
12. Pneu d'entraînement
13. Réducteur de vitesse d'entraînement
14. Wagon arrière
15. Plaque d'extrémité du wagon arrière
16. Plaque principale d'entraînement du wagon avant
17. Plaque de commande avant
18. Volet d'étanchéité flexible
19. Roue à rebord
20. Plaque d'entraînement du wagon arrière
21. Supports d'essieu du wagon arrière
22. Roue intermédiaire du wagon
23. Plaque d'entraînement avant
24. Système de génération électrique avant du wagon
25. Plaque d'entraînement arrière
26. Système d'alarme de sécurité du wagon avant
27. Boîtier de commande de l'onduleur A/C
28. Pivot de l'essieu avant du wagon de tête
29. Cornière de support du cadre du wagon
30. Unité d'essieu pour support de roue
31. Connexions arrière à chape
32. Brides de support d'essieu
33. Connexions avant à chape
34. Supports de voie pour écartement de rail
35. Support de la station d'entraînement
36. Base de support du boîtier de commande de l'onduleur
37. Bague de retenue pour le support d'entraînement
38. Bride de fixation du réducteur à vis-jack
39. Structure de déchargement de la boucle extérieure
40. Colonnes de support du système de déchargement
41. Flasque de roue pour virage à 90°
42. Tube guide annulaire pour rouleaux de support de l'installation de virage
43. Collier de montage du support de virage
44. Pente de la station de déchargement
45. Tas de roche déchargée
46. Châssis du wagon pour phase multi-unités

III.10. Utilisation en développement :

Au-delà du transport de production en régime permanent, le Rail-Veyor peut également accélérer le **développement minier**. Deux configurations sont documentées :

Développement à double rampe — le Rail-Veyor évacue les stériles de développement depuis le front en avancée, permettant à l'équipe de développement de maintenir une progression continue sans attendre les cycles des camions.

- **Développement par double galerie / descenderie en spirale** — des galeries parallèles ou une descenderie continue en spirale sont équipées de la voie Rail-Veyor au fur et à mesure de leur avancement, de sorte que le système qui transporte les stériles de développement devient celui qui transportera ensuite le minerai de production.

Trois conséquences en découlent :

Réduction du temps avant production (date de première production avancée et reconnaissance accélérée des revenus).

Évacuation continue des stériles, libre des goulots d'étranglement liés aux cycles de camions.

Exploitabilité en air de retour, puisque l'absence de gaz d'échappement diesel supprime la principale contrainte de ventilation sur le transport en développement.

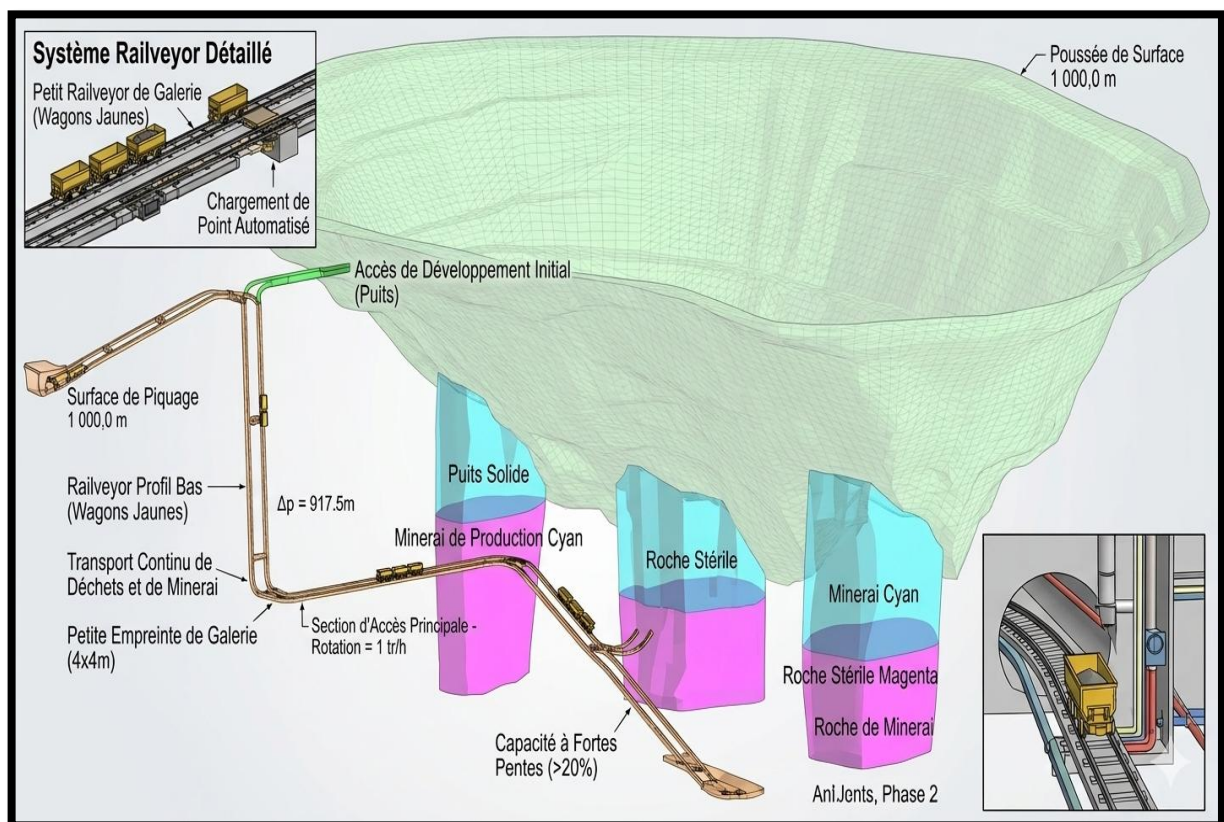


Figure III.18 : Modèle d'intégration du système Rail-Veyor dans une exploitation minière souterraine, illustrant les capacités de pente et le transport continu.

III.11. Propreté — Performance environnementale :

L'électrification complète du Rail-Veyor produit une réduction immédiate et quantifiable des émissions atmosphériques et de la consommation de carburant par rapport à un parc de camions diesel. Le Tableau 3.4, reproduit de la documentation du fabricant, présente les émissions évitées lorsque le Rail-Veyor remplace un camion-benne de classe 22 t sur un cycle aller-retour de 12,6 miles, pour une production annuelle représentative de 858 648 t.

Tableau III.4 Économies d'émissions et de carburant obtenues par le Rail-Veyor par rapport à un parc de camions diesel équivalent (référence fabricant).

Polluant	Facteur d'émission (g / bhp·h)	Émissions par camion (g/h)	Émissions par trajet (g)	Émissions totales pour tous les trajets (g)	Émissions évitées (lb)
CO	15,5	7 750	3 875	151 239 136	333 425
HC	1,3	650	325	12 684 573	27 965
NO _x	4,0	2 000	1 000	39 029 455	86 045
PM	0,1	50	25	975 736	2 151

Paramètres de référence : 858 648 t transportées par an ; camion de 22 t ; 39 029 trajets de camion supprimés par an ; 2 trajets·h⁻¹ ; distance aller-retour 12,6 miles ; puissance camion 500 hp ; consommation 7 mpg → **≈ 70 253 gallons de gazole économisés par an.**

Trois bénéfices environnementaux supplémentaires découlent de l'électrification :

- **Demande de ventilation réduite** — l'élimination de la principale source de particules diesel et de NO_x souterrains permet un redimensionnement du circuit de ventilation primaire, avec des économies correspondantes en capital et en exploitation.
- **Demande en eau réduite** — le Rail-Veyor ne nécessite pas de pulvérisation d'abattage des poussières aux niveaux requis pour les pistes de camions non revêtues.
- **Charge thermique réduite** — aucune chaleur de moteur n'est rejetée dans l'atmosphère minière, ce qui allège la charge thermique sur la réfrigération souterraine.

En 2020, ces caractéristiques ont valu au Rail-Veyor le prix Mining Cleantech Challenge — Product Innovation Showcase.

III.12. Sécurité — Sécurité au travail et sécurité opérationnelle :

L'argumentaire de sécurité du Rail-Veyor repose sur six piliers :

Retrait du personnel des zones dangereuses — le fonctionnement autonome signifie qu'aucun conducteur n'est exposé aux collisions, aux chutes de blocs ou aux incendies de véhicule souterrains.

Localisation déterministe du train — comme le train est contraint à une voie fixe, sa position est connue à chaque instant ; cela élimine la principale cause de collisions véhicule–piéton dans le transport minier.

Feux et alarmes d'avertissement de proximité — chaque station d'entraînement émet un signal visuel et sonore à l'approche d'un train, alertant le personnel dans la zone immédiate.

Émissions acoustiques réduites — le système fonctionne à des niveaux de bruit substantiellement inférieurs à ceux des camions diesel, améliorant l'environnement de radiocommunication et réduisant la perte auditive professionnelle.

Aucune particule diesel — élimine le principal cancérogène reconnu dans les mines souterraines de roche dure.

Charge incendie quasi nulle — pas de carburant embarqué, pas d'huile hydraulique embarquée, pas de pneus en contact de friction continu ; l'IHM met également en œuvre un schéma d'alarme à trois niveaux pour une intervention précoce.

Ces caractéristiques s'alignent directement avec les objectifs de zéro accident et de suppression des fatalités qui régissent de plus en plus la réglementation algérienne et internationale en matière de sécurité minière.



Figure III.19 : Risque d'incendie majeur et vulnérabilité structurelle d'une bande transporteuse conventionnelle.

III.13. Rentabilité — Performance énergétique et économique :

Le fabricant publie la performance comparative reproduite dans le Tableau 3.5, pour un service de référence de **3 000 t/h sur 10 km** de transport, avec un coût de l'énergie électrique de 0,08 USD/kWh et un coût du gazole de 1,04 USD/L.

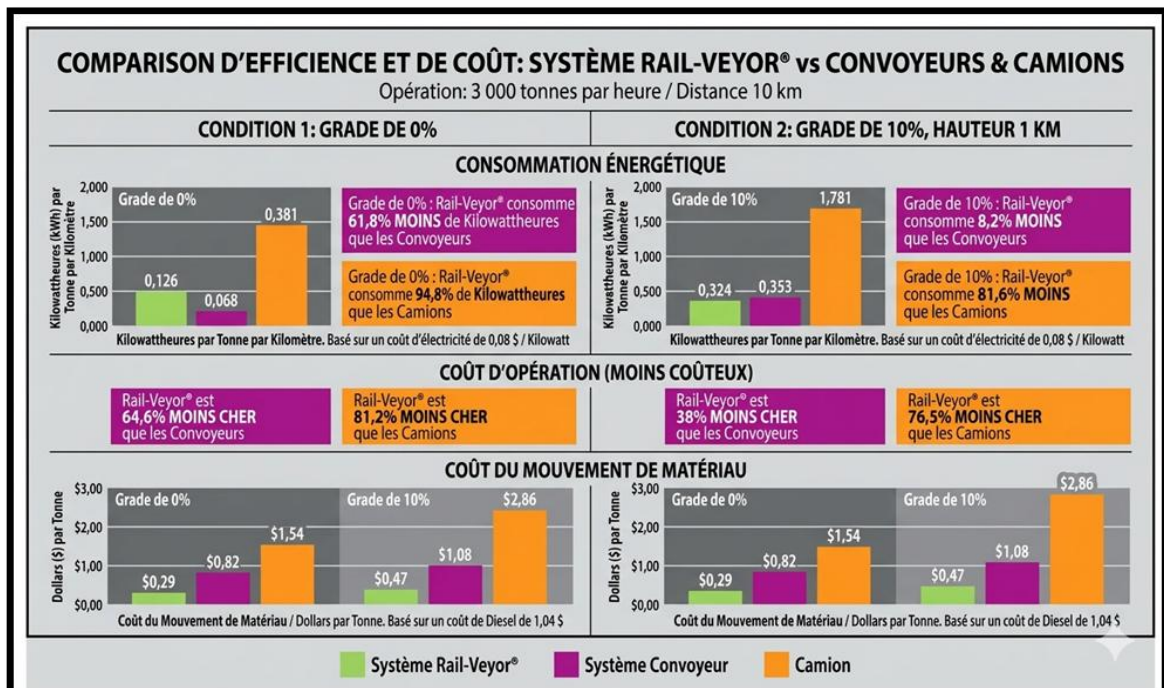


Figure III.20 : Comparaison de l'efficacité énergétique et des coûts d'opération entre le système Rail-Veyor, les convoyeurs et les camions.

Tablau III.5 Performance comparative énergétique et économique (Rail-Veyor vs convoyeurs vs camion)

Pente	Indicateur	Rail-Veyor vs Convoyeurs	Rail-Veyor vs Camions
0 %	Consommation d'énergie	61,8 % kWh	94,8 % kWh
Pente 10 %,	Consommation d'énergie	8,2 % kWh	81,6 % kWh
0 %	Coût de déplacement de la matière	64,6 %	81,2 %
Pente 10 %, elevation 1km	Coût de déplacement de la matière	38 %	76,5 %

Exprimées sur base unitaire, les consommations spécifiques publiées sont :

- **Rail-Veyor** : $0,025 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ — LCOM $\approx 0,29 \text{ USD/t}$
- **Convoyeur** : $0,068 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ — LCOM $\approx 0,82 \text{ USD/t}$
- **Camion** : $0,501 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ — LCOM $\approx 1,54 \text{ USD/t}$

Le Coût Nivelé du Déplacement de Matière (LCOM) est annualisé et inclut les composantes CAPEX, exploitation et maintenance. Même en tenant compte des conditions limites optimistes du fabricant, l'écart d'ordre de grandeur entre le Rail-Veyor et les camions diesel justifie une étude de faisabilité détaillée pour tout projet où les distances de transport dépassent 1 km et où le tonnage annuel dépasse environ 1 Mt — deux conditions remplies à Bled El Hadba.

III.14. Avantage concurrentiel — Comparaison synthétique :

Tableau III.6 Synthèse des avantages concurrentiels (données fabricant).

	Rail-Veyor	Camions	Convoyeurs
Infrastructure	Légère, faible empreinte ; installation/déplacement aisés	Grands espaces requis ; voirie lourde	Complexe ; permanente
Exploitation	Faible coût ; entièrement automatisée ; alimentation à la demande	Coût élevé ; dépendante de la main-d'œuvre ; flexible	Coût moyen ; continue marche/arrêt ; rigide
Maintenance	Faible coût ; composants à vie projet ; basée sur l'inspection	Coût élevé ; révisions, pneus ; intensive en main-d'œuvre	Coût moyen ; nombreuses pièces propriétaires ; 100 % arrêt pour maintenance

kWh / t·km	0,025	0,501	0,068
LCOM USD/t	0,29	1,54	0,82

III.15. Lignes directrices d'application :

Le fabricant recommande le Rail-Veyor lorsque l'enveloppe opérationnelle suivante est respectée:

- **Distance de transport** : optimalement > 1 km.
- **Tonnage annuel** : optimalement > 1 Mt ($\approx 0,9$ Mt) par an.
- **Granulométrie** : wagons de 30 en 762 mm de largeur acceptent ≤ 24 en (610 mm) ; wagons de 48 en (1 219 mm) de largeur acceptent ≤ 36 en (914 mm) — sous réserve de la distribution granulométrique réelle.
- **Capacité en courbe** : rayon minimal de 18,3 m (60 ft) pour wagons de 60 in de long ; 30 m pour wagons de 30 in ; 35 m pour wagons de 48 in.
- **Capacité en pente** : jusqu'à 30 % en service continu.
- **Longueur du train** : pas de limite technique supérieure — le nombre et la longueur des trains sont optimisés au cas par cas.

III.16. Proposition budgétaire :

Le fabricant propose deux étapes d'estimation successives, résumées dans le Tableau III.7. La classe de précision suit la classification AACE International des estimations de coût.

Tableau III.7 Étapes d'estimation des coûts

Étape	Livrable	Précision sur CAPEX / OPEX	Coût pour le client
Budgétaire (Étape 2)	Proposition du système Rail-Veyor	$\pm 20 - 30 \%$	Inclus dans la phase de proposition
Accord de services d'ingénierie (Étape 3)	CAPEX / OPEX validé	$\pm 5 - 10 \%$	150 000 - 200 000 USD

Dans le cadre de ce PFE, la classe de précision budgétaire (Étape 2) est appropriée, puisque l'objectif est de démontrer la faisabilité technique et d'établir un argumentaire économique d'ordre de grandeur

pour l'application à Bled El Hadba — et non d'engager Ferphos / SOMIPHOS dans un accord de services d'ingénierie de l'Étape 3.

III.17. Processus d'achat :

Le parcours commercial complet proposé par Rail-Veyor Technologies Global Inc. comprend cinq étapes séquentielles :

Étape 1 : Collecte de données et remplissage du questionnaire client (géométrie de la mine, taux de production, caractéristiques des matériaux, contraintes d'infrastructure).

Étape 2 : Proposition du système Rail-Veyor avec estimations CAPEX / OPEX à $\pm 20 - 30$ % de précision.

Étape 3 : Accord de services d'ingénierie (engagement payant, 150 - 200 k USD), validant le CAPEX / OPEX à $\pm 5 - 10$ %.

Étape 4 : Contrat d'achat du système, approvisionnement et fabrication.

Étape 5 : Construction, installation, mise en œuvre et mise en service sur site.

Le présent PFE se positionne aux **Étapes 1 / 2** : il fournit le jeu de données techniques et l'argumentation économique préliminaire qui soutiendraient une demande formelle d'Étape 2 auprès du fournisseur.

III.18. Synthèse et transition vers l'application à Bled El Hadba :

Le système Rail-Veyor combine, dans un produit intégré unique, quatre propriétés qu'aucune technologie de transport concurrente n'offre simultanément :

- **La faible consommation spécifique d'énergie** d'une bande transporteuse ($0,025 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$).
- **La flexibilité géométrique** d'un camion-benne (capacité de pente 30 %, rayon minimal de courbure 20 m).
- **Le fonctionnement autonome et sans conducteur** d'un métro automatisé.
- **Une infrastructure légère, démontable et déplaçable** qui suit le plan minier au lieu de le contraindre.

Avec des économies annuelles publiées de l'ordre de 70 000 gallons de gazole et 200 t de polluants atmosphériques réglementés par million de tonnes transportées, ainsi qu'une réduction d'un facteur 5 à 6 du coût nivelé de déplacement de matière, le Rail-Veyor est un candidat crédible pour la modernisation du transport de la mine de phosphate de Bled El Hadba — d'autant plus que la production annuelle de la mine est substantielle, que le coût domestique du gazole est en hausse et que l'Algérie est engagée par l'Accord de Paris.

Dans le chapitre 04, nous allons présenter une comparaison entre le Rail-Veyor et le convoyeur à bande afin d'évaluer leurs performances et de déterminer la solution la plus adaptée au transport du minerai dans la mine de Bled El Hadba.

III. 19. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser en détail le système Rail-Veyor, en mettant en évidence son principe de fonctionnement, ses caractéristiques techniques, ainsi que ses performances opérationnelles dans le cadre du transport du minerai. L'étude menée a montré que ce système constitue une solution de transport guidé présentant des spécificités particulières en matière de capacité, de continuité de fonctionnement, de sécurité d'exploitation et d'intégration dans les environnements miniers. Cette présentation a ainsi offert une compréhension globale de sa structure, de ses composants essentiels et de son apport potentiel dans les chaînes de transport minier.

L'examen du Rail-Veyor a également permis d'identifier les paramètres techniques qui influencent directement son efficacité, notamment la vitesse de déplacement, la configuration du système, les exigences de maintenance et les contraintes d'implantation. Ces éléments montrent que l'évaluation d'une solution de transport ne peut pas se limiter à sa description théorique, mais doit s'inscrire dans une approche comparative prenant en compte les conditions réelles d'exploitation, les besoins de production et les objectifs économiques du projet.

Dans cette perspective, il devient nécessaire d'évaluer la pertinence du Rail-Veyor face à une solution plus conventionnelle et largement utilisée dans le transport minier, à savoir le convoyeur à bande. Une telle comparaison permettra d'analyser, de manière plus objective, les avantages et les limites de chaque système selon des critères techniques, économiques et opérationnels. Le chapitre suivant sera donc consacré à cette étude comparative dans le

contexte spécifique de la mine de Bled El Hadba à Bir El Ater, afin d'identifier la solution la plus adaptée aux exigences du site et aux contraintes du projet.

Chapitre IV :

Comparaison entre le Rail-Veyor et le convoyeur à bande dans la mine de Bled El Hadba

IV.1.Introduction :

Dans les chapitres précédents, l'étude a porté de manière générale sur le projet minier de Bled El Hadba, en présentant ses principales caractéristiques géologiques, l'importance de ses réserves ainsi que la répartition du corps minéralisé dans la région. Cette analyse a également permis de préciser le cadre général du projet ainsi que les enjeux liés à sa future mise en exploitation.

Le transport du minerai constitue l'un des éléments essentiels du processus minier, en raison de son influence directe sur la performance globale de l'exploitation et sur le coût total de production. Dans un contexte industriel marqué par des exigences croissantes en matière de productivité, de continuité de service et de maîtrise des coûts, il devient nécessaire d'évaluer les solutions de transport les plus adaptées aux conditions spécifiques du site.

Par ailleurs, les secteurs minier et industriel sont aujourd'hui confrontés à des besoins de plus en plus importants en matière de transport de matériaux en vrac sur de longues distances et dans des environnements parfois contraignants. Les solutions conventionnelles ne répondent pas toujours de manière satisfaisante à ces nouvelles exigences, ce qui pousse à rechercher des technologies plus performantes, plus flexibles et mieux adaptées aux réalités du terrain.

Dans ce cadre, le système Rail-Veyor, développé comme solution de transport guidé pour les matériaux en vrac, représente une alternative technologique intéressante. Ce système se distingue par sa capacité à assurer un transport continu, par sa flexibilité d'adaptation aux contraintes du site et par ses performances opérationnelles, notamment dans les applications minières de grande ampleur.

Ainsi, le présent chapitre a pour objectif de comparer, sur le plan technique, le Rail-Veyor et le convoyeur à bande dans le cadre du transport du minerai à Bled El Hadba. Cette comparaison vise à mettre en évidence les avantages et les limites de chaque solution, afin d'évaluer leur pertinence au regard des exigences d'exploitation, des contraintes d'installation, des besoins de maintenance et de l'efficacité globale du système de transport.

IV.2. Système Rail-Veyor :

IV.2.1. Avantages environnementaux :

L'exploitation d'un système Rail-Veyor peut contribuer de manière significative à la réduction de l'impact environnemental d'une exploitation minière. Grâce à son principe de fonctionnement électrique et à son mode de transport optimisé, ce système permet de limiter la consommation énergétique globale ainsi que les émissions associées aux moyens de transport conventionnels. Dans le contexte du projet de **Bled El Hadba**, cet aspect revêt une importance particulière, notamment en raison des exigences croissantes liées à la protection de l'environnement et à la maîtrise des coûts indirects d'exploitation.

IV.2.1.1. Réduction de l'empreinte carbone :

La conception du Rail-Veyor repose sur une logique d'efficacité énergétique qui permet de transporter une même quantité de minerai avec une dépense énergétique inférieure à celle des systèmes de transport classiques. Cette réduction de la consommation énergétique se traduit mécaniquement par une diminution des émissions de gaz à effet de serre, en particulier lorsque l'énergie utilisée provient de sources fossiles. À l'inverse, lorsque l'alimentation électrique repose sur des sources renouvelables, l'impact carbone du système peut être considérablement réduit.

Dans le cas de **Bled El Hadba**, l'adoption d'un tel système pourrait donc constituer un levier intéressant pour améliorer le bilan environnemental global du projet, tout en répondant aux exigences de plus en plus strictes en matière de performance écologique.

IV.1.2.2. Absence d'émissions particulières directes :

Contrairement aux camions à moteur diesel, qui génèrent des émissions atmosphériques importantes, le Rail-Veyor fonctionne sans rejet direct de gaz d'échappement sur le site. Cette caractéristique améliore la qualité de l'air dans la zone d'exploitation et réduit l'exposition des travailleurs aux particules fines et aux polluants issus de la combustion. Elle contribue également au respect des normes environnementales relatives aux poussières et aux émissions industrielles.

Dans un projet minier de grande ampleur tel que **Bled El Hadba**, cette réduction des émissions locales constitue un avantage notable, tant sur le plan sanitaire que sur le plan réglementaire.

IV.1.2.3. Réduction du bruit et des poussières :

Le fonctionnement du Rail-Veyor se distingue également par un niveau sonore relativement faible et une émission de poussières limitée par rapport aux systèmes de transport conventionnels. Cette caractéristique améliore les conditions de travail sur le site et contribue à la création d'un environnement plus sûr, plus confortable et plus conforme aux exigences modernes de santé et de sécurité au travail.

IV.1.2.4. Conditions d'exploitation favorables :

Le Rail-Veyor présente une bonne adaptabilité aux contraintes du milieu minier. Son fonctionnement est peu sensible aux conditions climatiques, et il peut être exploité sur des terrains présentant des variations topographiques importantes. De plus, son architecture technique permet une continuité de service dans des conditions d'exploitation variées, ce qui constitue un atout important pour un projet comme **Bled El Hadba**.

IV.3. Exploitation, maintenance et sécurité du Rail-Veyor :

IV.3.1. Maintenance simplifiée :

Le Rail-Veyor a été conçu dans une logique de maintenance réduite et de fiabilité opérationnelle élevée. Son architecture modulaire facilite l'inspection, le remplacement des composants et la gestion préventive des interventions. Contrairement à certains systèmes de transport plus complexes, il ne nécessite pas de révisions lourdes à mi-vie, ce qui peut réduire les arrêts prolongés et les coûts de maintenance.

Dans le cadre de **Bled El Hadba**, cette simplicité de maintenance représente un facteur favorable, en particulier dans un environnement où la disponibilité des équipements est un critère essentiel de performance.

IV.3.2. Sécurité d'exploitation :

Sur le plan sécuritaire, le Rail-Veyor présente plusieurs avantages notables. L'absence de moteur diesel à proximité immédiate des zones de travail réduit les risques liés aux émissions

toxiques. De plus, le système présente un risque d'incendie relativement faible et peut être surveillé à distance grâce à des dispositifs de contrôle automatisé. Cette automatisation améliore la sécurité du personnel tout en renforçant la fiabilité du système.

IV.3.3. Propreté et autonomie :

Le Rail-Veyor se distingue également par son fonctionnement propre, basé sur une alimentation électrique efficace et sans émission directe. Dans certaines configurations, il peut même récupérer de l'énergie lors des phases de descente en charge. Son automatisation permet par ailleurs de limiter la présence d'opérateurs embarqués, ce qui améliore à la fois la sécurité et la stabilité de l'exploitation.

IV.3.4. Flexibilité d'exploitation :

Le système peut fonctionner avec un ou plusieurs trains, selon les besoins de production. La longueur de la voie et la configuration des stations peuvent être adaptées aux exigences du projet. Par ailleurs, sa structure permet des opérations de déplacement ou d'extension relativement rapides, sans recourir systématiquement à des fondations lourdes en béton.

IV.4. Système de convoyeur à bande :

IV.4.1. Limites techniques :

Bien que le convoyeur à bande soit une solution largement utilisée dans le transport minier, il présente certaines limites techniques lorsqu'il est confronté à des conditions d'exploitation difficiles. Sa simplicité apparente peut masquer des difficultés importantes, notamment en matière de nettoyage, d'encrassement et d'adaptation aux matériaux collants ou humides. Ces phénomènes peuvent nuire à la continuité du transport et augmenter les besoins de maintenance.

Dans le contexte de **Bled El Hadba**, ces limites doivent être prises en compte avec attention, en particulier si les conditions de fonctionnement impliquent des matériaux abrasifs, des variations d'humidité ou des distances importantes.

IV.4.2. Contraintes de maintenance :

Le convoyeur à bande nécessite une surveillance régulière de plusieurs organes essentiels, notamment la bande elle-même, les rouleaux, les tambours, les dispositifs de tension, les

moteurs et les éléments de réduction de vitesse. Les problèmes les plus fréquents concernent le nettoyage, les dérèglements de la bande, les blocages de rouleaux, les défaillances du moteur, les défauts du réducteur ou encore les problèmes électriques.

Dans une exploitation de type industriel, la répétition de ces incidents peut entraîner des arrêts non planifiés, une baisse de productivité et une augmentation significative des coûts de maintenance.

IV.4.3. Entretien et réparation :

L'entretien d'un convoyeur à bande repose principalement sur la qualité du suivi technique et sur la rapidité d'intervention en cas d'usure ou de dommage. La propreté de la bande, la bonne efficacité des systèmes de nettoyage et le réglage de la tension constituent des éléments essentiels pour éviter les déportements, les dégradations prématurées et les interruptions de service.

Les réparations doivent être réalisées dès l'apparition des premiers défauts afin d'éviter leur propagation. Les déchirures, les craquelures, les détériorations localisées du revêtement ou de la carcasse, ainsi que les dommages aux talons ou aux jonctions, nécessitent des interventions adaptées selon la nature et l'ampleur de l'avarie. En pratique, la durée de vie d'un convoyeur dépend fortement de la qualité de la maintenance préventive et du respect des procédures d'inspection.

IV.4.4. Nettoyage et exploitation courante :

Même avec des dispositifs de nettoyage performants et un bon design des goulottes, il reste difficile d'éliminer totalement l'encrassement des organes exposés. L'ampleur de ce phénomène dépend de plusieurs facteurs, notamment le débit transporté, la nature du minerai, sa granulométrie, son humidité et la vitesse de déplacement de la bande. C'est pourquoi des opérations périodiques de nettoyage complet sont nécessaires sur les rouleaux, les tambours, les tabliers et les goulottes.

IV.5. Comparaison entre les deux systèmes :

Dans le cadre de **Bled El Hadba**, la comparaison entre le Rail-Veyor et le convoyeur à bande doit être menée selon plusieurs critères : performance énergétique, impact environnemental, fiabilité, maintenance, sécurité, adaptabilité au terrain et coût global d'exploitation. Le Rail-

Veyor se distingue par une meilleure efficacité environnementale, une automatisation plus poussée et une maintenance simplifiée. Le convoyeur à bande, quant à lui, demeure une solution éprouvée, mais plus sensible aux contraintes d'exploitation, à l'encrassement et aux besoins d'entretien continu.

Ainsi, le choix entre ces deux systèmes ne dépend pas uniquement de leurs caractéristiques techniques intrinsèques, mais également de leur adéquation avec les conditions spécifiques du site, les objectifs de production et les exigences de durabilité du projet.

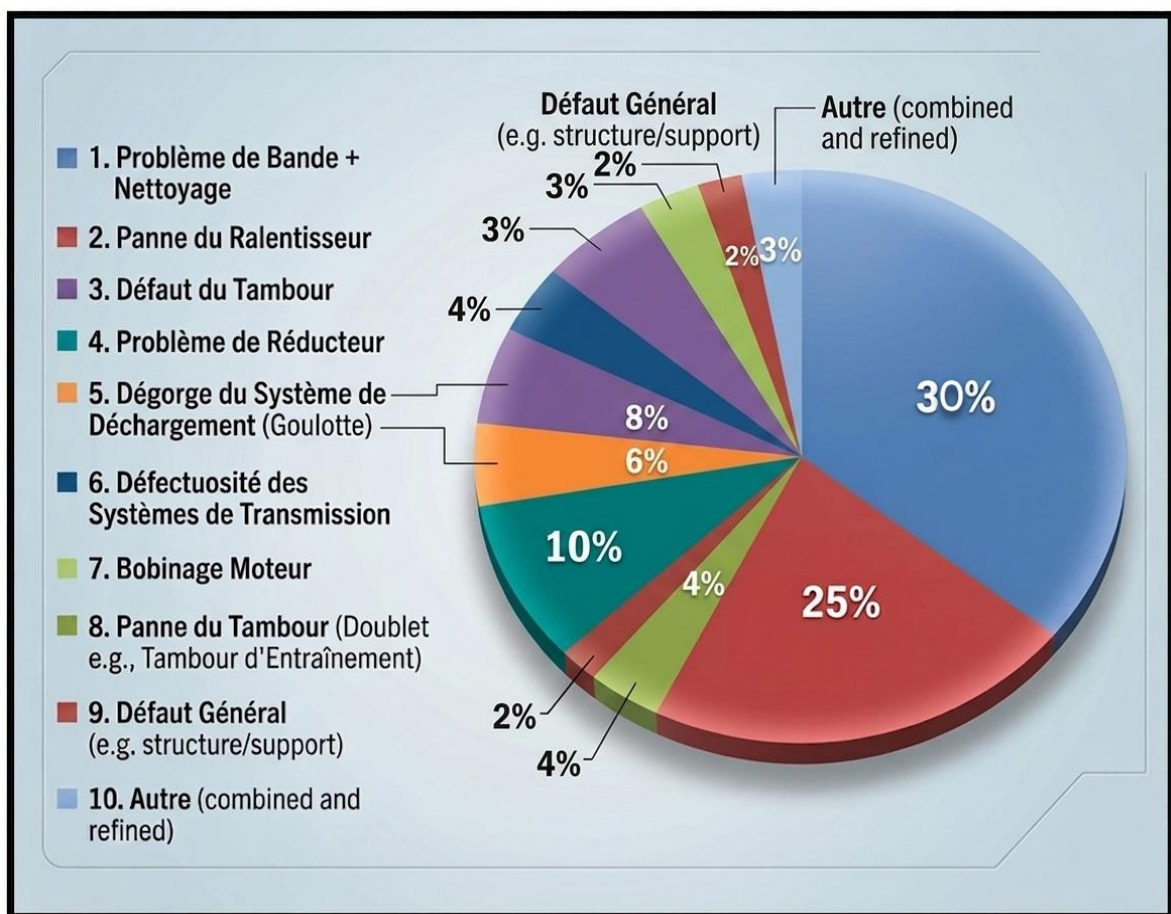


Figure IV.1 : Représentation graphique de réparation les nombres des pannes dans l'année (estimé)

	Rail-veyor	Camion	Convoyeur
Infrastructure	Léger / Faible	De Grands Espaces	Complexe
	Encombrement	Requis	Permanent
	Installation/Relocalisation	Lourd Chaussée	
	Faciles		
Opération	Faible Coût	Coût	Coût Moyen
	Entièrement	Élevé	Marche/Arrêt
	Automatisé	Travail	Continue Rigide
	De puissance sur la Base selon les besoins	Dépendait	
		Flexible	
Entretien	Faible Coût	Coût Élevé	Coût Moyen
	Changement de pièce facile	Les Révisions, Pneus	De
	La Durée De Vie Des Composants Basé Sur		
	l'Inspection.	Filtration et Lubrification	Nombreuses pièces exclusives
			100% vers le bas pour l'entretien

Tableaux IV.1 : la différence entre la technologie Moderne rail-veyor et le camion et le convoyeur a bande (estimé).

IV.6. Comparaison :

L'analyse comparative entre le système **Rail-Veyor** et le convoyeur à bande montre que chacun de ces deux moyens de transport répond à des logiques d'exploitation différentes, avec des performances, des contraintes et des domaines d'application qui ne sont pas identiques. Dans le cadre du projet de **Bled El Hadba**, où le transport du minerai constitue un élément stratégique du processus minier, cette comparaison revêt une importance particulière, car elle permet d'évaluer de manière rigoureuse la solution la plus appropriée aux exigences techniques, économiques et opérationnelles du site.

Le système Rail-Veyor se distingue avant tout par sa conception orientée vers le transport continu de matériaux en vrac sur des distances relativement longues, avec une structure plus légère que celle des installations de convoyage classiques. Son architecture sur voie guidée permet de limiter les contraintes liées au génie civil, tout en offrant une certaine souplesse d'intégration dans des environnements topographiques complexes. Dans le cas de **Bled El Hadba**, où les conditions d'implantation peuvent être exigeantes, cette caractéristique constitue un avantage majeur, notamment lorsque l'on cherche à réduire les travaux préparatoires et à faciliter l'adaptation du système aux contraintes réelles du terrain.

L'un des points forts du Rail-Veyor réside dans sa capacité à transporter le minerai de façon continue, sans recourir à une succession importante de points de transfert. Or, dans les systèmes classiques de convoyage, les zones de reprise et de déchargement représentent souvent des points sensibles, car elles sont associées à des pertes de matière, à la génération de poussières, à une usure localisée des équipements et à des besoins de maintenance plus élevés. En réduisant le nombre de ces interfaces, le Rail-Veyor contribue à améliorer la continuité du flux de matière et à renforcer la fiabilité globale du transport.

Par ailleurs, le fonctionnement du Rail-Veyor est marqué par une bonne adaptabilité aux variations de charge et aux configurations du site. Cette flexibilité permet d'envisager différentes modalités d'exploitation en fonction du débit recherché, du rythme de production et des évolutions futures du projet. La possibilité de moduler la capacité de transport en ajoutant des unités supplémentaires ou en ajustant la configuration du système lui confère une valeur particulière dans une logique de développement progressif. Pour un projet comme **Bled El Hadba**, qui peut évoluer en fonction des besoins de production et des choix

stratégiques de mise en valeur du gisement, cette capacité d'adaptation représente un argument important.

Sur le plan énergétique, le Rail-Veyor présente également un intérêt notable. Son principe de fonctionnement vise à optimiser le déplacement du matériau tout en limitant certaines pertes liées aux systèmes conventionnels. Dans une période où la maîtrise de la consommation énergétique est devenue un enjeu central dans les industries extractives, cette caractéristique peut contribuer à améliorer le bilan global du projet. En outre, lorsque l'alimentation électrique est bien intégrée à l'infrastructure du site, le système peut offrir une exploitation plus propre et plus compatible avec les objectifs actuels de réduction des émissions et de limitation de l'empreinte environnementale.

Du point de vue de la maintenance, le Rail-Veyor offre également des perspectives favorables. Son architecture modulaire, son automatisation et la relative simplicité de certains de ses organes techniques permettent de réduire la complexité des interventions. Contrairement aux systèmes très étendus de convoyeurs à bande, qui nécessitent souvent une surveillance continue de multiples composants tels que les rouleaux, les tambours, les stations de tension, les dispositifs de nettoyage et les jonctions de bande, le Rail-Veyor tend à réduire le nombre d'éléments exposés à une usure rapide ou à des dysfonctionnements fréquents. Cela peut se traduire, à moyen et long terme, par une meilleure disponibilité opérationnelle et par une diminution des temps d'arrêt liés à la maintenance corrective.

En revanche, le convoyeur à bande demeure une solution éprouvée, largement utilisée dans l'industrie minière pour sa capacité à assurer un transport continu sur des flux importants. Toutefois, ses performances restent fortement dépendantes des conditions de mise en œuvre, de la qualité du dimensionnement initial et de la régularité des opérations de maintenance. Dans un environnement où les matériaux peuvent être abrasifs, humides ou collants, ou lorsque les distances de transport deviennent importantes, les contraintes d'exploitation s'accroissent. Les zones de transfert, les systèmes de nettoyage, les dispositifs de tension et les composants mécaniques doivent alors faire l'objet d'un suivi rigoureux afin d'éviter les défaillances et les arrêts de production.

En comparaison, le Rail-Veyor apparaît comme une solution qui réduit un certain nombre de limitations structurelles du convoyeur à bande, en particulier celles liées à l'encombrement, à la complexité des implantations et à la sensibilité aux zones de transition.

Sa capacité à évoluer dans des configurations plus souples, avec moins d'infrastructures permanentes, lui confère une meilleure adaptabilité dans les situations où les caractéristiques du terrain ou la progression du projet imposent des ajustements réguliers du système de transport.

Un autre aspect fondamental de la comparaison concerne la sécurité et les conditions de travail. Le Rail-Veyor, grâce à son automatisation et à son mode de fonctionnement guidé, limite la présence humaine dans les zones de transport et réduit certains risques liés à l'exploitation directe. Il contribue également à un environnement de travail potentiellement moins exposé aux poussières, au bruit et aux émissions localisées. À l'inverse, les convoyeurs à bande, bien que sécurisés par de nombreuses normes industrielles, exigent une vigilance plus importante dans les zones d'entretien, de nettoyage et de contrôle des déviations de bande. Dans un projet comme **Bled El Hadba**, où les objectifs de performance doivent s'accompagner de considérations de sécurité et de durabilité, ce critère prend toute son importance.

Il convient également de souligner que le choix entre Rail-Veyor et convoyeur à bande ne peut pas être limité à une simple comparaison de leurs caractéristiques techniques intrinsèques. Il doit être replacé dans un cadre plus large intégrant la stratégie de développement du site, le calendrier de mise en exploitation, les objectifs de production à moyen et long terme, ainsi que les contraintes budgétaires et environnementales. Dans cette optique, le Rail-Veyor peut représenter une solution particulièrement pertinente lorsque l'on recherche un compromis favorable entre efficacité, flexibilité, réduction des travaux d'infrastructure et optimisation de l'exploitation. Le convoyeur à bande, quant à lui, conserve des atouts solides dans les contextes où le tracé est maîtrisé, les distances sont compatibles avec son fonctionnement et la maintenance peut être assurée dans des conditions stables.

Ainsi, l'étude comparative met en évidence que le Rail-Veyor constitue une alternative technologique crédible pour le transport du minerai à **Bled El Hadba**, en particulier lorsque les priorités du projet concernent la réduction de l'encombrement, l'amélioration de la flexibilité du système, la limitation des points de transfert et l'optimisation des coûts d'exploitation à long terme. Le convoyeur à bande reste néanmoins une solution de référence, notamment dans les exploitations où son implantation est déjà bien maîtrisée et où les conditions opérationnelles lui sont favorables. Le choix final dépendra donc de

l'équilibre entre les exigences du site, les contraintes techniques et les objectifs économiques du projet.

En définitive, cette comparaison ne vise pas uniquement à opposer deux technologies de transport, mais à montrer que leur pertinence respective dépend de la nature du projet minier, de la configuration du terrain et du niveau de performance recherché. Dans le cas de **Bled El Hadba**, l'évaluation détaillée des deux systèmes permet de dégager des éléments objectifs utiles à la prise de décision et à l'orientation future du schéma de transport du minerai.

Tableau IV.2 : Comparaison technique entre le Rail-Veyor et le convoyeur à bande

Critère	Rail-Veyor	Convoyeur à bande
Principe de transport	Transport guidé par wagons circulant sur une voie légère	Transport continu assuré par une bande en mouvement
Infrastructures requises	Infrastructures légères, modulaires et relativement simples	Infrastructures plus lourdes et plus permanentes
Installation	Mise en place rapide et adaptable	Installation plus complexe et plus contraignante
Occupation de l'espace	Faible encombrement	Encombrement plus important
Niveau d'automatisation	Système entièrement automatisé	Système automatisé ou semi-automatisé selon la configuration
Mode de fonctionnement	Fonctionnement continu avec grande flexibilité d'exploitation	Fonctionnement continu mais plus rigide
Consommation énergétique	Relativement faible	Moyenne à élevée selon la distance et la charge
Maintenance	Maintenance simplifiée, modulaire et moins contraignante	Maintenance plus fréquente et plus technique
Poussières et bruit	Génération réduite de poussières et de nuisances sonores	Poussières et bruit plus importants, notamment aux points de transfert

Critère	Rail-Veyor	Convoyeur à bande
Points de transfert	Nombre réduit de points de transfert	Présence de plusieurs points de transfert
Flexibilité d'exploitation	Grande flexibilité	Flexibilité limitée
Capacité d'extension	Facilement extensible par ajout d'unités ou de lignes	Extension plus complexe et plus coûteuse
Sécurité	Niveau de sécurité élevé grâce au pilotage à distance et à l'automatisation	Sécurité correcte, mais exposition accrue aux risques mécaniques
Domaine d'application le plus adapté	Longues distances et terrains difficiles	Trajets fixes et installations permanentes

IV.7.Conclusion :

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'intérêt d'une solution de transport innovante pour l'acheminement du minerai dans le contexte du projet de Bled El Hadba, en tenant compte des limites des systèmes de transport conventionnels et des exigences actuelles en matière de productivité, de sécurité, de flexibilité et de performance énergétique. Cette réflexion s'inscrit dans une logique de modernisation des procédés miniers, particulièrement dans le cas de gisements de grande envergure et de longue durée de vie, où le système de transport constitue un maillon stratégique de la chaîne d'exploitation.

L'analyse menée a montré que les moyens de transport traditionnels, bien qu'ils aient longtemps répondu aux besoins des exploitations minières, présentent progressivement des limites lorsqu'ils sont confrontés à l'évolution des contraintes techniques, économiques et environnementales. En particulier, les exigences croissantes liées à la réduction des coûts d'exploitation, à l'amélioration de l'efficacité énergétique, à l'automatisation et à la sécurité du personnel imposent de reconsidérer les solutions existantes et d'envisager des alternatives plus adaptées aux conditions modernes d'exploitation.

Dans ce cadre, le système Rail-Veyor apparaît comme une technologie particulièrement pertinente pour le transport du minerai à Bled El Hadba. Son principe de fonctionnement, qui combine certains avantages du transport ferroviaire et du convoyage continu, lui confère une grande souplesse d'utilisation, une capacité de transport intéressante et un potentiel réel de réduction des coûts indirects liés à l'exploitation. Par ailleurs, sa conception modulaire et son niveau élevé d'automatisation en font une solution apte à répondre aux contraintes d'un projet minier de grande ampleur.

L'étude comparative réalisée a permis de mettre en évidence que le Rail-Veyor peut constituer une alternative crédible au convoyeur à bande, notamment dans les configurations où la topographie, la distance de transport et les conditions d'implantation rendent les solutions classiques moins performantes ou plus coûteuses. Dans le cas de Bled El Hadba, cette technologie présente un intérêt particulier en raison de sa capacité à s'adapter aux besoins futurs du projet tout en offrant une meilleure maîtrise de l'énergie, de la maintenance et de l'impact environnemental.

Recommandations :

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour le projet de Bled El Hadba

- Approfondir l'étude technico-économique du système Rail-Veyor à travers une analyse détaillée des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance.
- Évaluer la compatibilité du système avec les caractéristiques géométriques, topographiques et opérationnelles du site.
- Intégrer le Rail-Veyor dans une logique de développement progressif, afin d'adapter son dimensionnement aux phases futures du projet.
- Comparer le Rail-Veyor avec les solutions conventionnelles sur la base d'indicateurs objectifs tels que la disponibilité, la consommation énergétique, la sécurité et la flexibilité.
- Prévoir une étude pilote ou une simulation industrielle, afin de valider les performances du système dans les conditions réelles de Bled El Hadba.
- Prendre en compte les aspects environnementaux, notamment la réduction des émissions, du bruit et des poussières, dans le choix final de la technologie de transport.

En définitive, le Rail-Veyor représente une solution prometteuse pour le transport du minéral à Bled El Hadba. Son adoption éventuelle devrait toutefois être fondée sur une étude complémentaire approfondie, intégrant les paramètres techniques, économiques et environnementaux propres au projet. Une telle démarche permettrait de garantir un choix rationnel, durable et cohérent avec les objectifs de valorisation du gisement.

Conclusion générale :

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que l'étude du projet de **Blad El Hadba**, situé à **Bir El Ater dans la wilaya de Tébessa**, doit être abordée dans une perspective globale intégrant à la fois le cadre géologique, les contraintes d'exploitation et les choix technologiques liés au transport du minerai. Le premier chapitre a permis de mettre en évidence les caractéristiques géologiques et minières du gisement, ainsi que les particularités du site de Bir El Ater, qui confèrent à ce projet une importance stratégique majeure dans la valorisation des ressources phosphatées en Algérie orientale. Cette analyse préliminaire a montré que la nature du gisement, son ampleur et son contexte géographique imposent une réflexion scientifique rigoureuse sur les solutions de transport les plus adaptées à ses conditions d'exploitation.

Le deuxième chapitre, consacré au **convoyeur à bande**, a permis d'examiner en détail le principe de fonctionnement, les avantages et les limites de cette technologie, qui demeure l'une des solutions les plus utilisées pour le transport continu des matériaux en vrac. Toutefois, l'analyse a également montré que, malgré sa maturité industrielle et sa simplicité apparente, le convoyeur à bande présente des contraintes importantes dans les contextes miniers complexes, notamment en matière de flexibilité, de maintenance, d'adaptation aux longues distances et de sensibilité aux variations des conditions topographiques et d'exploitation. Dans le cas d'un gisement de grande envergure comme Blad El Hadba, ces limites deviennent particulièrement significatives et conduisent à reconsidérer la pertinence de cette solution comme option exclusive de transport.

Le troisième chapitre, consacré au système **Rail-Veyor**, a mis en évidence les principes de fonctionnement de cette technologie innovante, ses composants principaux, ainsi que ses potentialités dans le domaine de la manutention des matériaux en vrac. L'étude de cette solution a montré qu'elle combine des caractéristiques du transport ferroviaire et du transport continu, tout en offrant une architecture plus souple, une automatisation plus avancée et un potentiel intéressant en matière de performance énergétique. Les analyses techniques ont permis de souligner que Rail-Veyor constitue une réponse moderne aux exigences actuelles des grands projets miniers, où la recherche de productivité, de fiabilité, de sécurité et de réduction des coûts d'exploitation devient prioritaire.

Dans le quatrième chapitre, la comparaison entre **Rail-Veyor** et le **convoyeur à bande** a constitué l'étape décisive de cette étude. Cette comparaison a montré que, si le convoyeur à bande conserve des atouts certains dans des configurations classiques et bien maîtrisées, Rail-Veyor offre une solution plus adaptée aux contraintes spécifiques de Blad El Hadba, en particulier lorsqu'il s'agit de transporter des volumes importants sur de longues distances, dans un environnement minier appelé à évoluer dans le temps. La confrontation des deux systèmes, sur les plans technique, opérationnel, économique et environnemental, a ainsi permis de dégager une supériorité fonctionnelle du Rail-Veyor dans le cadre étudié, notamment en termes de flexibilité, de maintenance, de consommation énergétique et de capacité d'adaptation à l'évolution future du projet.

Sur la base de l'ensemble des analyses menées, il est donc possible d'affirmer que la proposition du système **Rail-Veyor** comme solution de transport pour la mine de phosphate de **Blad El Hadba** repose sur une justification scientifique cohérente et solide. Ce choix ne constitue pas seulement une alternative technique au convoyeur à bande, mais s'inscrit dans une démarche plus large de modernisation des systèmes miniers, d'optimisation des performances globales et de prise en compte des exigences de durabilité. L'adoption d'une telle technologie apparaît ainsi comme une orientation rationnelle pour un projet minier de cette ampleur, où les enjeux de compétitivité, de continuité d'exploitation et de respect de l'environnement sont étroitement liés.

En définitive, cette étude a permis de montrer que la réussite d'un projet minier de grande envergure ne dépend pas uniquement de la richesse géologique du gisement, mais également de la pertinence des choix technologiques opérés en aval. Dans cette perspective, **Rail-Veyor** se présente comme une solution d'avenir, capable de répondre aux défis posés par le transport du phosphate à Blad El Hadba, tout en offrant une base technique crédible pour une exploitation plus performante, plus sûre et plus durable.

LES SOURCES

- 1 : Données du département études développement (DED)
- 2 : Rapport géologique actualisé de la mine de Blad El Hadba – Wilaya de Tébessa –
- 3 : Arcelor Mittal, « Plan de développement et d'exploitation », déc. 2014.
- 4 : « Abdelouafi et Rechach – 2015 – Caractérisation et choix d'une méthode de traitement.pdf ».
- 5 : « État des réserves exploitables par plages de qualité » – Division Étude et Développement (DED)
- 6 : Abederahmane, N., Khochemane, L., Gadri, L., Rais, K., & Bennis, O. (2018). Impact of air pollution with dust in the Blad El Hadba mine – NE Algeria. *Mining Science*, 25, 19-31.
- 7 : Bouzenoune, A., & Lécolle, P. (1997). Petrographic and geochemical arguments for hydrothermal formation of the Blad El Hadba deposit (NE Algeria). *Mineralium Deposita*, 32(2), 189-196.
- 8 : Plan des réserves de la mine de Blad El Hadba (31/12/2019)
- 9 : Amec (2011). Estimation de ressources et planification minière ; Blad El Hadba et Boukhara.
- 10 : Classification de la méthode d'exploitation selon SCHECHEKO.
- 11 : Poulard, X., Daupley, et C. Didier, « Exploitation minière et traitement des minerais », févr. 2017.
- 12 : « Partie d'exploitation 2017 à la mine de Blad El Hadba ». 2017.
- 13 : Mine de fer de l'est – préservation 2019.
- 14 : Bureau méthode de la mine de Blad El Hadba.
- 15 : Atlas-Copco : operating, safety and maintenance manual CM780D TIER III.
- 16 : Total Rock Drilling Technology, crawler down the hole for high productivity in quarries and open pit mines. Hole range 110–165 mm.
- 17: Souad Narsis (Cheriet. F, 2009), Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie – Magistère (École doctorale), 2012.
- 18 : ONEX : Office national des substances explosives.
- 19 : « Liebherr R 9100 Fiche technique (2014–2019) – Recherche Google ».

20: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.cat.com/fr_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highwaytrucks/18256810.html

21 : Mémoire de fin d'études

22 : Caractéristiques techniques bureau méthode

23 : <https://ocssystem.fr/conveyor-expertise/avantages-et-inconvenients-des-differents-systemes-de-convoyeurs/>

24 : Premier système de transport : Madlala, Ollie. Harmony va installer le ferroviaire dans la nouvelle mine « Mining Weekly ». Récupéré 05/01/2014.

25 : Our History Archived 2013-10-24 at the Wayback Machine Rail-Veyor. Retrieved 2014-01-05.

26 : Vale puts a breakthrough in mining to the test in Sudbury Mining and Exploration. Retrieved 2014-01-05.

27 : Harper Government Announces Clean Technology Projects in Ontario. Natural Resources Canada. Retrieved 2014-01-05.

28 : Risto Elias Laamanen, The Globe and Mail. Retrieved 2014-01-05.

29 : « Rail-Veyor - Recherche Google ».

30 : E. Fisk et al., « Drive station arrangements », WO2016004516A1, janv. 2016.

31 : « Équipement de manutention de matériaux | Rail-Veyor ».
<https://fr.railveyor.com/technical.php> (consulté le 20 avr. 2021). : « Système de convoyeur à rouleaux par rapport aux camions | Rail-Veyor ».
<https://fr.railveyor.com/comparisons.php> (consulté le 20 avr. 2021). : All information contained herein is the property of Rail-Veyor Technologies Global, Inc. The intellectual and technical concepts contained herein are proprietary to Rail-Veyor Technologies Global, Inc., may be subject to a nondisclosure agreement and/or other agreement(s) governing confidential information of Rail-Veyor, are covered by U.S. and foreign patents or patent applications in process, and are protected by U.S. and foreign trade secret or copyright law. Dissemination of this information or reproduction of this material, via any medium, is strictly forbidden unless prior written permission is obtained from Rail-Veyor Technologies Global, Inc. : <https://ocssystem.fr/conveyor-expertise/avantages-et-inconvenients-des-differents-systemes-de-convoyeurs/>