



جمهورية 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 :

Option :

Élaboration et conception en prévision pour la planification de la
fermeture de la restauration et réhabilitation des mines
Cas des mines épuisées et en activité.

Par

1.... HOUAM Sami

2.... DOUMIR Mahmoud Abderrahmane

Devant le jury :

NOUIOUA Ismail	Président		Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
DABBOUZ Mokhtar	Encadreur		Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
DERBAL Chams eddinne	Examineur		Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026



استمارة رفع التحفظات بعد المناقشة

السنة الجامعية: 2025/2026

معلومات خاصة بطالب الماستر:

اسم ولقب المترشح:

Houem Sami
Doumir Mahmoud Abdelrahman

عنوان المذكرة: Elaboration et conception en prévision pour la planification
de la fermeture de la restauration et réhabilitation des mines
Cas des mines épuisées et en activité

معلومات خاصة بالأستاذ المناقش:

Pr. Derbel chameledine
Docteur

بناء على التحفظات المسجلة أثناء مناقشة المذكرة:

RAS

وبعد متابعة التعديلات والتصحيحات

أصرح بصفتي الأستاذ المناقش، أن المذكرة قد استوفت شروط مناقشتها، وتؤهل صاحبها لتقديم ملفه للحصول
على شهادة الماستر.

في:

الأستاذ المناقش: (الاسم واللقب والإمضاء)

Derbel N.

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

أنا الممضي أدناه،

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

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

إمضاء المعني (٥)

04 جوان 2026

عن الرئيس المجلس الشعبي البلدي
وبمقتضى منحه
المساء مالكية ريفية
ون الإدارة الإقليمية

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

أنا الممضي أدناه،

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

التاريخ: 20.26.06.04

۱۴۰۵ هجری خورشیدی ۲۰۲۶



DÉDICACE

Je dédie ce travail à mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mes études.

À mon encadrant Mr DEBBOUZ Mokhtar pour sa patience et ses conseils précieux.

À tous mes camarades de promotion 2025/2026.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont tout d'abord à Monsieur DEBBOUZ Mokhtar, notre encadrant, pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son expertise dans le domaine de l'exploitation minière et de la fermeture des mines a été d'une grande valeur pour la qualité de cette recherche.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants de l'Institut des Mines de l'Université Echahid Chikh Larbi Tébessi pour la formation de qualité qu'ils nous ont dispensée.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours universitaire.

RÉSUMÉ

La fermeture des mines constitue la dernière étape du cycle minier, mais sa planification doit débiter dès les premières phases d'exploration. Ce mémoire aborde l'élaboration et la conception en prévision pour la planification de la fermeture, de la restauration et de la réhabilitation des mines, en se focalisant sur les cas des mines épuisées et en activité.

L'étude s'appuie sur une analyse approfondie des concepts fondamentaux de la fermeture minière, des processus de réhabilitation écologique et des cadres législatifs internationaux et algériens. La nouvelle Loi minière algérienne n° 25-12 du 3 août 2025, avec ses dispositions innovantes sur le plan de réhabilitation et la provision fiscale, constitue un cadre juridique majeur pour ce travail.

Les études de cas internationales, notamment la reconversion de la mine de sel de Turda en Roumanie, le Quarry Hotel en Chine et l'Eden Project au Royaume-Uni, illustrent les possibilités de seconde vie des sites miniers. La réhabilitation progressive, recommandée par l'ICMM, démontre son efficacité dans la réduction des coûts et des risques.

Ce travail propose des recommandations pour les opérateurs miniers, les autorités réglementaires algériennes, les communautés locales et la recherche universitaire, afin d'assurer une transition durable de l'exploitation minière vers un usage post-mine bénéfique pour les générations futures.

Mots-clés :

Fermeture de mine, restauration écologique, réhabilitation progressive, plan de fermeture, mines souterraines, mines à ciel ouvert, développement durable, Loi minière algérienne 25-12, ICMM, post-fermeture.

ABSTRACT

Mine closure represents the final stage of the mining life cycle, yet its planning must begin during the earliest exploration phases. This thesis addresses the elaboration and design for the planning of mine closure, restoration, and rehabilitation, focusing on the cases of depleted and active mines.

The study relies on an in-depth analysis of fundamental concepts of mine closure, ecological rehabilitation processes, and international and Algerian legislative frameworks. The new Algerian Mining Law No. 25-12 of August 3, 2025, with its innovative provisions on rehabilitation plans and tax provisions, constitutes a major legal framework for this work.

International case studies, including the conversion of the Turda salt mine in Romania, the Quarry Hotel in China, and the Eden Project in the United Kingdom, illustrate the possibilities for a second life of mining sites. Progressive rehabilitation, recommended by the ICMM, demonstrates its effectiveness in reducing costs and risks.

This work proposes recommendations for mining operators, Algerian regulatory authorities, local communities, and university research to ensure a sustainable transition from mining operations to beneficial post-mining use for future generations.

Keywords:

Mine closure, ecological restoration, progressive rehabilitation, closure plan, underground mines, open-pit mines, sustainable development, Algerian Mining Law 25-12, ICMM, post-closure.

الملخص

تُعدّ إغلاق المناجم المرحلة الأخيرة من دورة حياة التعدين، غير أنّ التخطيط له يجب أن ينطلق منذ المراحل الأولى للاستكشاف. يتناول هذا البحث إعداد وتصميم التخطيط المسبق لإغلاق المناجم واستعادة المواقع وإعادة تأهيلها البيئي، مع التركيز على حالات المناجم المستنفدة والمناجم قيد التشغيل.

تستند الدراسة إلى تحليل معمّق للمفاهيم الأساسية لإغلاق المناجم، وعمليات إعادة التأهيل البيئي، والأطر التشريعية الدولية والجزائرية. يشكّل القانون الجزائري للمناجم رقم 12-25 الصادر في 3 أغسطس 2025، بأحكامه المبتكرة المتعلقة بخطة إعادة التأهيل والمخصص الضريبي، إطاراً قانونياً رئيسياً لهذا العمل.

تُبيّن دراسات الحالة الدولية، ولا سيما تحويل منجم ملح توردا في رومانيا، وفندق المحجر في الصين، ومشروع عدن في المملكة المتحدة، الإمكانيات الهائلة لإعادة إحياء المواقع المنجمية. كما تُبرهن إعادة التأهيل التدريجي، الموصي بها من قبل، على فعاليتها في خفض التكاليف والمخاطر (ICMM) المجلس الدولي للتعدين والمعادن.

يقدم هذا البحث توصيات موجهة إلى مشغلي المناجم، والهيئات التنظيمية الجزائرية، والمجتمعات المحلية، والبحث الجامعي، بهدف ضمان انتقال مستدام من نشاط التعدين إلى استخدام ما بعد التعدين يعود بالنفع على الأجيال القادمة.

إغلاق المنجم، الاستعادة البيئية، إعادة التأهيل التدريجي، خطة الإغلاق، المناجم تحت الأرض، المناجم: الكلمات المفتاحية
السطحية، التنمية المستدامة، القانون الجزائري للمناجم 12-25، المجلس الدولي للتعدين والمعادن، ما بعد الإغلاق

LISTE DES ABRÉVIATIONS

APEC : Asia-Pacific Economic Cooperation

CCME : Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement

DMA : Drainage Minier Acide

DRA : Drainage Rocheux Acide

EPA : Environmental Protection Agency

GC : Gouvernement du Canada

ICMM : International Council on Mining and Metals

IFRS : International Financial Reporting Standards

INAC : Indian and Northern Affairs Canada

LoM : Life of Mine (Durée de vie de la mine)

LPSP : Leading Practice Sustainable Development

NEDEM : Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier

ONU : Organisation des Nations Unies

OSCE : Organisation pour la Sécurité et la Coopération en Europe

OTAN : Organisation du Traité de l'Atlantique Nord

PGES : Plan de Gestion Environnementale et Sociale

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

SER : Society for Ecological Restoration

TSF : Tailings Storage Facility (Installation de stockage des résidus)

UBC : University of British Columbia

WSP : WSP Global Inc.

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé (Français

Abstract (English)

ملخص (Arabe)

Liste des abréviations

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE I — CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES 4

1.1 Définitions et concepts fondamentaux	5
1.1.1 Qu'est-ce qu'un plan de fermeture ?.....	5
1.1.2 La fermeture comme processus	5
1.1.3 Life of Mine (LoM) et la gestion de l'après-fermeture	6
1.2 Développement durable et fermeture	6
1.2.1 Les quatre objectifs généraux de réhabilitation.....	6
1.3 Cadre législatif et réglementaire.....	7
1.3.1 Contexte international (ICMM, APEC, ONU).....	7
1.3.2 Contexte algérien — Loi n° 25-12 du 3 août 2025	8
1.4 Les phases du cycle de vie minier et la fermeture	8
1.5 Impacts environnementaux de l'exploitation minière et enjeux de la fermeture ..	10
1.6 Le secteur minier algérien et les enjeux de la fermeture	11
1.7 Méthodologie de recherche	12
1.8 Problématique et hypothèses de recherche	12

CHAPITRE II — ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS	13
2.1 Causes de fermeture d'une mine	14
2.1.1 Fermeture planifiée	14
2.1.2 Fermeture prématurée	14
2.2 Types de fermeture	16
2.3 Étapes du processus de fermeture	16
2.4 Objectifs de la fermeture	17
2.5 Les trois étapes fondamentales du plan de fermeture	17
2.6 Gestion des eaux de mine et drainage acide	18
2.7 Sécurité publique et gestion des risques post-fermeture	19
2.8 Planification intégrée et conception pour la fermeture	20
 CHAPITRE III — PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE	 22
3.1 Qu'est-ce qu'un plan de restauration ?	23
3.2 Les processus de restauration écologique	23
3.2.1 Définitions selon la Society for Ecological Restoration (SER 2004)	23
3.2.2 La réhabilitation progressive	25
3.3 Techniques de stabilisation des sols	26
3.4 Méthodologies de réhabilitation écologique	27
3.5 Remise en état des mines souterraines	28
3.6 Caractérisation des matériaux miniers et gestion des stériles	29
3.7 Revégétalisation et restauration des écosystèmes	30
3.8 Innovations et technologies émergentes en réhabilitation minière	31
3.9 Considérations particulières pour les mines d'uranium et les sites radioactifs	31
 CHAPITRE IV — ÉTUDE DES CAS PRATIQUES	 33
4.1 Cas des mines épuisées dans le monde	34
4.1.1 Mine de sel de Turda (Roumanie) — Reconversion en parc d'attractions	34
4.1.2 Quarry Hotel (Chine) — Hôtel cinq étoiles dans une carrière	36

4.1.3 Eden Project (Royaume-Uni) — Centre de formation écologique.....	37
4.1.4 Jardin botanique (Colombie-Britannique, Canada)	38
4.2 Cas des mines en activité — Fermeture progressive	38
4.3 Cas des mines à ciel ouvert épuisées	39
4.4 Analyse comparative des cas d'étude	40
4.5 Perspectives pour les mines en activité en Algérie.....	40
4.6 Les mines épuisées en Algérie.....	41
4.6.1 La mine de Sidi-Kamber	42
4.6.2 Cas de la mine de phosphates d'El-Kouif (Tébessa)	44
4.6.3 Les mines de charbon de Kenadsa (Béchar).....	45
4.6.4 La mine de Chaabet El-Hamra (Sétif)	46
4.7 Les mines et les carrières en activité en Algérie	47
4.7.1 Cas de la mine de Djebel Onk (Tébessa).....	47
4.7.2 Cas de Boukhadra.....	48
4.7.3 Cas de l'Ouenza	50
4.8 Analyse des échecs de fermeture et leçons apprises.....	51
4.9 Innovations dans la reconversion des sites miniers	52

CHAPITRE V — ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE.....

5.1 Transition socio-économique	54
5.2 Financement de la fermeture	54
5.2.1 Provision pour réhabilitation (Algérie).....	54
5.2.2 Garantie financière	55
5.2.3 Estimation des coûts de fermeture.....	55
5.3 Gouvernance et institutions	55
5.4 Mécanismes de financement internationaux comparés	57
5.5 Indicateurs de performance et critères d'achèvement	57
5.6 Transition socio-économique et développement post-mine	60
5.7 Cadre institutionnel et gouvernance de la fermeture en Algérie	61

CHAPITRE VI — SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS.....

62

6.1 Synthèse globale sur la fermeture d'une mine	63
6.2 Recommandations	64
6.2.1 Pour les opérateurs miniers	64
6.2.2 Pour les autorités réglementaires algériennes.....	65
6.2.3 Pour les communautés locales.....	66
6.2.4 Pour la recherche universitaire	66
6.3 Perspectives de recherche et développement.....	67
6.4 Conclusion du chapitre et bilan de la recherche	67
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	69
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72
ANNEXES	75
Annexe A — Glossaire de la terminologie de la fermeture des mines.....	75
Annexe B — Liste de vérification pour l'élaboration d'un plan de fermeture.....	76
Annexe C — Tableau comparatif des législations minières.....	77
Annexe D — Chronogramme type pour la fermeture d'une mine souterraine	78
Annexe E — Cartographie des risques post-fermeture	79

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Exemple de drainage minier acide (DMA) — coloration orange caractéristique due à la présence de fer et d'autres métaux lourds.....	19
Figure 2.2 Cadre de gestion des risques pour la fermeture des mines — approche intégrée basée sur le modèle 3D des risques	21
Figure 3.1 Réhabilitation progressive d'une mine à ciel ouvert — remise en état des talus et préparation des sols pour la revégétalisation.....	26
Figure 3.2 Stabilisation d'une halde de stériles par bio-ingénierie — couverture végétale complète après réhabilitation écologique	28
Figure 3.3 Obturation d'un puits de mine abandonné — utilisation d'un bouchon gonflable pour sceller l'accès de manière sécurisée.....	29
Figure 4.1 Salina Turda (Roumanie) — Vue aérienne du parc d'attractions souterrain avec lac navigable et installations de loisirs	36
Figure 4.2 Salina Turda — Intérieur de la mine de sel reconvertie avec tables de billard et aménagements touristiques.....	36
Figure 4.3 InterContinental Shanghai Wonderland (Chine) — Vue nocturne de l'hôtel cinq étoiles intégré dans l'ancienne carrière avec cascade et lac artificiel	37
Figure 4.4 InterContinental Shanghai Wonderland — Vue panoramique nocturne montrant l'intégration architecturale dans les parois de la carrière.....	38
Figure 4.5 Localisation de la mine de Sidi-Kamber et vue du site abandonné — Contexte géographique et état actuel des installations minières désaffectées	44
Figure 4.6 Impacts environnementaux visibles sur le paysage et les sols avoisinants la mine de Sidi-Kamber — Dégradation de la végétation et contamination des sols	44
Figure 4.7 Carte historique de la région d'El-Kouif — Situation géographique du centre minier de phosphates dans le contexte de la wilaya de Tébessa	45
Figure 4.8 Vestiges industriels de la mine de charbon de Kenadsa — Structure métallique du lavoir et installations de triage abandonnées dans le paysage saharien.....	46
Figure 4.9 Photographie historique du lavoir et triage du charbon à Kenadsa — Archives de l'ECPAD, témoignant de l'activité industrielle minière dans la région de Colomb-Béchar.....	47
Figure 4.10 Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk (D'après Prian et Cortial, 1993)	49
Figure 4.11 Entrée de la mine souterraine de Boukhadra et vue panoramique de la carrière à ciel ouvert	50

Figure 4.12 Vue panoramique des mines de fer d'Ouenza en Algérie (vers les années 1950)	51
--	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les quatre objectifs généraux de réhabilitation.....	7
Tableau 1.2 Les phases du cycle de vie minier et les activités de fermeture associées	9
Tableau 1.3 Impacts environnementaux de l'exploitation minière et mesures de mitigation associées	11
Tableau 2.1 Les causes de fermeture prématurée d'une mine	16
Tableau 2.2 Classification des types de fermeture de mine	17
Tableau 2.4 Les trois étapes fondamentales du plan de fermeture.....	18
Tableau 2.5 Techniques de prévention et de traitement du drainage minier acide	20
Tableau 3.1 Terminologie de la restauration écologique des sites miniers.....	24
Tableau 3.2 Les avantages de la réhabilitation progressive	26
Tableau 3.3 Techniques de scellement des ouvrages miniers souterrains.....	29
Tableau 3.4 Classification et gestion des matériaux miniers	31
Tableau 4.1 Synthèse des avantages de la fermeture progressive	39
Tableau 4.2 Aspects à prendre en compte dans le plan de fermeture d'une mine à ciel ouvert	40
Tableau 4.3 Analyse comparative des études de cas.....	41
Tableau 4.4 Tableau récapitulatif des principales mines abandonnées en Algérie	42
Tableau 5.1 Rôles et responsabilités des acteurs de la fermeture.....	55
Tableau 5.2 Comparaison des mécanismes de financement de la fermeture des mines .	57
Tableau 5.3 Exemples d'indicateurs de performance et critères d'achèvement.....	58
Tableau 6.1 Synthèse des facteurs critiques de succès de la fermeture.....	63
Tableau C.1 Comparaison des cadres législatifs de fermeture des mines (Annexe C)...	77
Tableau D.1 Phases et durées du processus de fermeture d'une mine souterraine (Annexe D)	78
Tableau E.1 Matrice des risques post-fermeture (Annexe E)	79

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie minière constitue l'un des piliers fondamentaux du développement économique de nombreuses nations, fournissant les matières premières essentielles à l'ensemble des secteurs industriels. Cependant, l'exploitation minière demeure une utilisation temporaire des terres, soumise à une durée de vie limitée dictée par l'épuisement des ressources minérales ou par des considérations économiques, techniques et réglementaires. À ce titre, la fermeture des mines représente la dernière étape du cycle minier, mais sa planification doit impérativement débiter dès les premières phases d'exploration pour garantir une transition ordonnée, sécurisée et respectueuse de l'environnement.[5]

Selon l'International Council on Mining and Metals (ICMM), les meilleures pratiques exigent que la planification de fermeture soit intégrée dans le plan d'exploitation dès la phase de faisabilité, permettant ainsi d'anticiper les risques et les possibilités de fermeture de manière proactive. Cette approche, désignée sous le terme de « conception de la fermeture », implique l'intégration des activités de fermeture dans les processus de planification à court, moyen et long termes, tout au long de la durée de vie de la mine, en prenant en compte les considérations environnementales, sociales et économiques. [6]

La problématique centrale de ce mémoire s'articule autour de la question suivante : comment élaborer et concevoir un plan de fermeture intégré qui anticipe les enjeux environnementaux, sociaux et économiques pour les mines épuisées et en activité ? Cette interrogation revêt une importance particulière dans le contexte algérien, où la nouvelle Loi minière n° 25-12 du 3 août 2025 instaure des dispositions novatrices concernant le plan de réhabilitation et de remise en état des lieux, ainsi qu'une provision fiscale dédiée au financement des travaux de réhabilitation. [6]

Les objectifs spécifiques de cette recherche sont structurés comme suit :

1. Définir les concepts fondamentaux de la fermeture, de la restauration et de la réhabilitation des sites miniers ;
2. Analyser les processus de réhabilitation écologique et les techniques de stabilisation des sols ;
3. Examiner le cadre législatif et réglementaire international et algérien régissant la fermeture des mines ;

4. Étudier les cas pratiques des mines épuisées et à ciel ouvert, ainsi que les exemples de reconversion réussie ;
5. Proposer des recommandations pour une fermeture durable et une transition socio-économique bénéfique aux communautés locales.

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur une approche analytique et documentaire, combinant l'analyse des textes réglementaires, des guides de bonnes pratiques internationaux (ICMM, APEC, PNUE), des études de cas internationales et des publications scientifiques dans le domaine de l'écologie de la restauration. L'accent est particulièrement mis sur les lignes directrices de l'ICMM, la nouvelle législation algérienne et les exemples concrets de reconversion de sites miniers. [5]

Ce mémoire s'organise en six chapitres principaux. Le premier chapitre établit le cadre théorique et conceptuel de la fermeture des mines. Le deuxième chapitre analyse les activités de fermeture et les objectifs visés. Le troisième chapitre traite du plan de restauration et de la réhabilitation écologique. Le quatrième chapitre présente des études de cas pratiques illustrées par des images réelles. Le cinquième chapitre examine les aspects socio-économiques et financiers. Le sixième chapitre propose une synthèse et des recommandations. Enfin, une conclusion générale résume les enseignements tirés et ouvre des perspectives pour la recherche future. [6]

CHAPITRE I

**CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE
LA FERMETURE DES MINES**

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

La fermeture des mines constitue une phase cruciale du cycle de vie d'une exploitation minière, déterminant en fin de compte la nature de l'héritage laissé aux générations futures. Ce chapitre établit les fondements théoriques et conceptuels nécessaires à la compréhension de cette problématique complexe, en définissant les notions essentielles, en présentant le cadre du développement durable et en examinant les dispositions législatives internationales et algériennes qui encadrent cette activité. [2]

1.1 Définitions et concepts fondamentaux

La terminologie relative à la fermeture des mines est riche et parfois ambiguë, nécessitant une clarification préalable pour assurer la cohérence de l'analyse qui suivra. Les termes de fermeture, restauration, réhabilitation et remise en état sont fréquemment employés de manière interchangeable, bien qu'ils recouvrent des réalités distinctes. [3]

1.1.1 Qu'est-ce qu'un plan de fermeture ?

Un plan de fermeture de mine est un document technique dynamique et évolutif qui reflète les normes et principes d'entreprise, les directives réglementaires en vigueur, et fournit une base convenable pour l'estimation du coût de la fermeture. Selon le Programme des bonnes pratiques pour le développement durable de l'industrie minière (LPSD), ce plan doit comprendre une description détaillée des activités qui ont été planifiées pour la fermeture du site, les objectifs et les critères à la base de l'évaluation des options proposées, ainsi que les indicateurs clés de performance qui permettront de mesurer le succès de la fermeture. [6]

La conception de la fermeture implique l'intégration des activités de fermeture dans le plan d'exploitation de la mine, notamment dans les processus de planification à court, moyen et long termes, au cours de toute la durée de vie de la mine. Cette intégration doit prendre en compte les considérations environnementales, sociales et économiques de manière holistique. [5]

1.1.2 La fermeture comme processus

La fermeture de mines est intrinsèquement un processus continu et non un événement ponctuel. Pour être réussi, ce processus devrait commencer par une planification précoce, faire

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

appel à une réhabilitation progressive en cours d'exploitation et culminer enfin avec le déclassement, la réhabilitation et la rétrocession du site. Cette approche processuelle reconnaît que les décisions prises pendant les phases initiales du projet minier peuvent avoir des conséquences sur le long terme pour l'environnement, les utilisations futures des terres, la santé communautaire et la sécurité. [9]

1.1.3 Life of Mine (LoM) et la gestion de l'après-fermeture

La durée de vie d'une mine (Life of Mine, LoM) englobe l'ensemble des phases du cycle minier, de l'exploration initiale jusqu'à la post-fermeture. L'industrie minière épouse désormais le concept selon lequel l'achèvement et la rétrocession intègrent la remise d'une utilisation définie des terres après l'exploitation, plutôt qu'une simple fermeture lorsque la phase opérationnelle cesse et que le déclassement est terminé. Pour aider à une telle planification, une nouvelle phase dans la durée de vie de la mine sous le terme « Gestion de l'après-fermeture » est désormais reconnue comme essentielle.[14]

1.2 Développement durable et fermeture

Dans le secteur des minéraux, le développement durable signifie que les investissements dans les projets de minéraux devraient être financièrement rentables, techniquement appropriés, écologiquement sains et socialement responsables. Cette quadruple exigence constitue le fondement de toute planification de fermeture moderne et intégrée. La fermeture responsable d'une mine nécessite la participation active des communautés locales dans la planification et la mise en œuvre des actions afin que des profits durables puissent être reconnus par toutes les parties prenantes. [14]

1.2.1 Les quatre objectifs généraux de réhabilitation

Selon les lignes directrices du Gouvernement du Canada et de l'autorité australienne de protection de l'environnement, quatre objectifs généraux de réhabilitation peuvent être définis comme des objectifs de performance de réhabilitation. Ils devraient idéalement être rédigés pendant la phase de planification minière en consultation avec les parties prenantes et en accord avec ces dernières. [14]

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

Tableau 1.1 : Les quatre objectifs généraux de réhabilitation

Objectif	Description	Indicateurs de performance
Sécurité	La santé et la sécurité publiques futures ne doivent pas être compromises par les installations minières abandonnées	Obturation des ouvertures, stabilité des talus, signalisation adéquate
Absence de pollution	Le site ne doit pas constituer une source de contamination pour les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines	Qualité de l'eau conforme aux normes, absence de lixiviation des contaminants
Stabilité	Les topographies doivent être stables sur le plan géotechnique et résister aux risques de défaillance	Stabilité des reliefs, résistance à l'érosion, conformité à la topographie locale
Objectif	Description	Indicateurs de performance
Sécurité	La santé et la sécurité publiques futures ne doivent pas être compromises par les installations minières abandonnées	Obturation des ouvertures, stabilité des talus, signalisation adéquate
Absence de pollution	Le site ne doit pas constituer une source de contamination pour les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines	Qualité de l'eau conforme aux normes, absence de lixiviation des contaminants
Stabilité	Les topographies doivent être stables sur le plan géotechnique et résister aux risques de défaillance	Stabilité des reliefs, résistance à l'érosion, conformité à la topographie locale
Utilisation des terres	La capacité de soutenir une utilisation convenue des terres après la fin des activités minières	Revégétalisation réussie, habitat faunique approprié, fonctions écosystémiques restaurées

CHAPITRE I : CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

1.3 Cadre législatif et réglementaire

La fermeture des mines est encadrée par un ensemble complexe de textes législatifs, réglementaires et normatifs qui varient selon les juridictions mais partagent des principes communs fondés sur le développement durable et la protection de l'environnement. [1]

1.3.1 Contexte international (ICMM, APEC, ONU)

À l'échelle internationale, plusieurs organisations ont développé des cadres de référence pour la fermeture des mines qui servent de standards pour l'industrie minière mondiale. L'International Council on Mining and Metals (ICMM) a publié en février 2019 la deuxième édition de son « Integrated Mine Closure: Good Practice Guide », qui a été actualisée en 2025 pour renforcer les approches relatives à la fermeture des installations de stockage des résidus.

L'Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) a publié en février 2018 une « Liste de vérification pour la fermeture des mines à l'intention des gouvernements ». Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), en collaboration avec le PNUD, l'OSCE et l'OTAN, a identifié en 2005 les principales causes de fermeture d'une mine : l'épuisement des réserves, la baisse des prix des métaux, la modification des réserves géologiques, et les conditions environnementales, sociales ou politiques défavorables. [6]

1.3.2 Contexte algérien — Loi n° 25-12 du 3 août 2025

La nouvelle Loi minière algérienne n° 25-12 du 3 août 2025 représente une avancée majeure en matière de réhabilitation des sites miniers. Cette loi, publiée au Journal Officiel de la République Algérienne n° 5213 du 7 août 2025, introduit des dispositions novatrices qui renforcent considérablement les obligations des opérateurs miniers en matière de remise en état des sites après l'exploitation. [1]

L'article 141 dispose que : « Le plan de réhabilitation et de remise en état des lieux, qui doit être révisé tous les cinq (5) ans, comporte toutes les actions et travaux de réhabilitation et de remise en état des lieux et évalue les coûts y afférents. » L'article 142 impose au titulaire d'un titre minier de procéder à la remise en état des lieux et d'arrêter avec l'autorité administrative

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

compétente le coût estimé pour assurer les missions de contrôle et de prévention de l'après-mine. [1]

La loi introduit également une disposition fiscale majeure : la provision pour réhabilitation et remise en état des lieux. Cette provision permet au titulaire d'un titre minier de soustraire à l'impôt une partie de son bénéfice imposable pour financer les travaux de réhabilitation et prendre en charge les effets de l'après-mine. [1]

1.4 Les phases du cycle de vie minier et la fermeture

La planification de la fermeture d'une mine devrait être accomplie progressivement tout au long des diverses phases du cycle de vie d'un projet minier ; elle doit s'intégrer complètement au sein des pratiques et planification habituelles d'affaires de la société. La fermeture et la réhabilitation minières déterminent en fin de compte l'utilisation des terres pour les générations futures. [13]

Tableau 1.2 : Les phases du cycle de vie minier et les activités de fermeture associées

Phase	Caractéristiques	Activités de fermeture intégrées
Exploration	Phases initiales de la vie d'une mine prospective ; techniques allant de la télédétection au forage intensif	Application de normes élevées pour la gestion environnementale ; gestion des accès, plates-formes de forage, élimination des déchets
Faisabilité	Évaluation des impacts économiques, environnementaux et sociaux ; étude de délimitation, préfaisabilité, faisabilité bancable	Examens précis des implications de la fermeture ; informations essentielles pour la conception des programmes de gestion et les objectifs de réhabilitation
Planification et conception	Conception d'un système minier intégré ; activité multidisciplinaire impliquant ingénieurs, géologues et consultants	Intégration des conséquences pour l'environnement, utilisations futures des terres, santé et sécurité communautaires dans les décisions de conception

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

Construction	Création des changements visibles et impacts sur l'environnement ; plus haut niveau d'emploi	Décisions à long terme sur les fondations, stockage des résidus, gestion des eaux, stockage des carburants, manipulation des terres végétales
Exploitation	Phase de production stable de 5 à 20 ans (parfois plus de 50 ans) ; transformations opérationnelles et expansions	Allocation progressive des ressources financières, planification et mise en œuvre de la fermeture, réhabilitation progressive comme point central
Déclassement et fermeture	Mise en œuvre des plans de fermeture élaborés ; démolition, remblayage, revégétalisation	Études pour confirmer que les critères convenus de résultats et d'achèvement ont été satisfaits ; certification finale
Post-fermeture	Gestion et suivi continus jusqu'à la rétrocession finale ; appropriation par les nouveaux usagers des terres	Surveillance de la qualité de l'eau, du terrain, de l'écologie ; suivi socio-économique ; gestion du drainage minier acide ; période de 5 à 20 ans

1.5 Impacts environnementaux de l'exploitation minière et enjeux de la fermeture

Le développement d'une opération minière avec ses installations et infrastructures d'exploitation implique habituellement une altération permanente des modelés du relief existant, une perturbation de la flore, un bouleversement des habitats de la faune, des impacts hydrologiques ainsi qu'un certain niveau potentiel de contamination. La compréhension approfondie de ces impacts est indispensable pour concevoir un plan de fermeture qui remédie efficacement aux dommages causés et restaure les fonctions écosystémiques essentielles. [9]

CHAPITRE I : CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

Tableau 1.3 : Impacts environnementaux de l'exploitation minière et mesures de mitigation associées

Composante environnementale	Impact principal	Technique de mitigation	Indicateur de suivi
Topographie	Altération du relief, excavations, haldes	Reprofilage, terrassement, stabilisation	Conformité au plan de reprofilage, stabilité des pentes
Flore	Destruction de la végétation, invasion d'espèces exotiques	Stockage et réutilisation des terres végétales, plantation d'espèces indigènes	Couverture végétale, diversité spécifique, survie des plantations
Faune	Perte d'habitat, fragmentation, mortalité directe	Création de corridors, installation de refuges, clôtures de protection	Présence d'espèces indicatrices, utilisation des corridors
Eaux de surface	Modification des écoulements, sédimentation, contamination	Détournement des eaux non affectées, bassins de sédimentation, traitement	Débit, turbidité, pH, métaux lourds
Eaux souterraines	Perturbation des nappes, contamination par lixiviation	Barrières hydrauliques, drainage contrôlé, traitement in situ	Niveau piézométrique, qualité chimique, débit
Sol	Compaction, érosion, contamination chimique	Décompactage, amendement organique, phytoextraction	Texture, pH, teneur en contaminants, biomasse microbienne
Qualité de l'air	Poussières, émissions de gaz, odeurs	Arrosage, enrobage des haldes, couverture végétale	Concentration en particules, conformité aux normes

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

1.6 Le secteur minier algérien et les enjeux de la fermeture

Le secteur minier algérien occupe une place stratégique dans l'économie nationale, contribuant significativement aux revenus de l'État et à la création d'emplois. L'Algérie dispose d'un patrimoine géologique diversifié comprenant des gisements de fer, de phosphate, de zinc, de plomb, de mercure, d'antimoine, de barytine, de bentonite, de kaolin, de sel, de marbre, et de nombreuses autres ressources minérales.

Les mines exploitées avant l'indépendance, puis durant les premières décennies de l'ère post-coloniale, ont souvent fonctionné avec des normes environnementales moins strictes que celles en vigueur aujourd'hui. De nombreux sites historiques n'ont pas fait l'objet d'une remise en état systématique, créant un héritage de « mines orphelines » ou de sites partiellement réhabilités qui nécessitent des interventions complémentaires.

La nouvelle Loi n° 25-12 du 3 août 2025 marque un tournant dans la réglementation minière algérienne. L'article 140 dispose que le titulaire d'un titre minier est tenu de remettre en état le site minier à la fin de l'exploitation. L'article 141 impose l'élaboration d'un plan de réhabilitation révisable tous les cinq ans. L'article 142 renforce ces obligations en imposant au titulaire de procéder effectivement à la remise en état des lieux. [1]

1.7 Méthodologie de recherche

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur une approche analytique et documentaire, combinant l'analyse des textes réglementaires, des guides de bonnes pratiques internationaux, des études de cas internationales et des publications scientifiques dans le domaine de l'écologie de la restauration. L'approche comparative a été privilégiée pour mettre en perspective les pratiques algériennes avec les standards internationaux. [15]

1.8 Problématique et hypothèses de recherche

La problématique centrale de ce mémoire s'énonce comme suit : dans quelle mesure l'intégration précoce de la planification de fermeture dans le cycle de vie des mines, associée à une réhabilitation progressive et à un cadre législatif adapté, permet-elle d'assurer une transition durable et responsable de l'exploitation minière vers un usage post-mine bénéfique pour les communautés et l'environnement ? [15]

Trois hypothèses de recherche ont été formulées :

CHAPITRE I :CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE LA FERMETURE DES MINES

Hypothèse 1 : La planification de la fermeture dès la phase de faisabilité, conformément aux recommandations de l'ICMM et aux exigences de la Loi 25-12, réduit significativement les coûts globaux de fermeture et améliore la qualité de la réhabilitation par rapport à une approche tardive ; [6]

Hypothèse 2 : La réhabilitation progressive, mise en œuvre tout au long de la durée de vie de la mine, constitue une approche plus efficace sur les plans technique, financier et social que la remise en état différée à la fin de l'exploitation ; [15]

Hypothèse 3 : La participation active des communautés locales et la transparence dans la gestion de la fermeture sont des facteurs déterminants de la durabilité socio-économique du post-mine et de la prévention des conflits.[15]

CHAPITRE II

**ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE
MINE ET OBJECTIFS VISÉS**

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

La fermeture d'une mine est une opération complexe qui résulte de multiples facteurs et s'accompagne d'un ensemble d'activités techniques, environnementales et sociales rigoureusement planifiées. Ce chapitre examine les causes de fermeture, les types de fermeture, les étapes du processus, les objectifs visés et la structuration du plan de fermeture en trois phases fondamentales.

2.1 Causes de fermeture d'une mine

Les mines peuvent fermer pour de nombreuses raisons, mais les deux raisons les plus communes sont l'épuisement des réserves de minerai et la faiblesse du prix des minéraux ou des métaux, ce qui rend la mine non rentable. Toutefois, une mine extrait des réserves et non des ressources. La teneur et le tonnage de ces réserves peuvent varier d'un jour à l'autre selon le prix de la marchandise, la teneur du minerai ou sa qualité, les résultats d'explorations supplémentaires, les complications géotechniques ainsi que d'autres facteurs pouvant conduire à la fermeture de la mine avant que la réserve estimée n'ait été complètement extraite. [9]

2.1.1 Fermeture planifiée

De façon idéale, on ferme une mine uniquement lorsque ses ressources minérales sont épuisées. Un programme de fermeture de la mine est alors mis en place, et il est appliqué de façon progressive. Du temps peut être consacré à planifier, surveiller et effectuer des essais, et des fonds sont détenus en externe pour couvrir les coûts de la mise en pratique du programme de fermeture. Les parties prenantes sont préparées pour la date prévue de fermeture, les employés peuvent prendre leurs dispositions pour trouver un autre emploi et la communauté dispose de l'opportunité de travailler avec la mine pour assurer des avantages durables grâce aux activités de l'exploitation minière. [9]

2.1.2 Fermeture prématurée

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles les mines peuvent fermer de manière précoce, c'est-à-dire qu'elles ont fermé pour des raisons autres que l'épuisement ou l'appauvrissement des réserves. Ces raisons comprennent des facteurs économiques, géologiques, techniques, réglementaires, politiques et conjoncturels. Selon le PNUE, la majorité des mines qui ont fermé en Afrique au cours des dix dernières années ont fait l'objet de fermeture imprévue et non planifiée, avec des conséquences dramatiques pour les communautés locales et l'environnement. [9]

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

Tableau 2.1 : Les causes de fermeture prématurée d'une mine

Catégorie	Causes spécifiques	Exemples concrets
Économiques	Baisse du cours des minerais, coûts élevés de production, forte fiscalité, dépassement de budget	Fermeture de mines d'or en Afrique du Sud suite à la baisse des prix internationaux
Géologiques	Diminution imprévue des ressources exploitables, détérioration de la teneur, taille insuffisante du corps minéralisé	Abandon de gisements de cuivre en Zambie suite à la réévaluation des réserves
Techniques	Défaillances mécaniques, problèmes d'équipements, mauvaise conception du schéma d'exploitation	Effondrement de galeries dans des mines de charbon souterraines
Réglementaires	Annulation des titres pour violations des dispositions légales, non-respect des normes sécuritaires et environnementales, fraudes	Suspension de permis miniers en Indonésie pour non-conformité environnementale
Politiques	Changement de gouvernement, nouvelles options politiques, visions ou changements d'orientations	Nationalisation de mines en Bolivie et révision des contrats miniers
Conjoncturelles	Contingences de l'industrie en aval, chute du prix des minerais sur le marché international, fermetures d'industries ou de marchés en aval	Fermeture de mines de nickel en Nouvelle-Calédonie suite à la baisse de la demande chinoise

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

2.2 Types de fermeture

La fermeture d'une mine peut revêtir différentes formes selon les circonstances qui la motivent et les objectifs poursuivis. La distinction entre fermeture temporaire, définitive et soudaine est essentielle pour adapter la planification et les ressources nécessaires.

Tableau 2.2 : Classification des types de fermeture de mine

Type de fermeture	Caractéristiques	Durée	Activités principales
Temporaire (Care & Maintenance)	Arrêt programmé des activités d'extraction avec maintien des équipements et infrastructures en état de fonctionnement	Quelques mois à plusieurs années	Maintenance et entretien des équipements, réparation ou sécurisation d'ouvrages miniers, maintien d'un personnel réduit
Définitive	Achèvement complet de l'exploitation avec démantèlement des infrastructures et remise en état du site	2 à 10 ans (parfois davantage)	Démantèlement complet, gestion des résidus, élimination des produits chimiques, consolidation des talus, obturation des fosses, revégétalisation
Soudaine	Arrêt immédiat et imprévu des activités suite à des difficultés financières, techniques ou réglementaires	Immédiate	Sécurisation d'urgence des ouvrages, mise en sécurité des zones dangereuses, début du processus de déclassement sans planification préalable

2.3 Étapes du processus de fermeture

La fermeture d'une mine inclut plusieurs étapes successives qui constituent un processus méthodique et structuré. D'abord, il y a la mise en service qui se caractérise par la mise à pied progressive de la majorité des travailleurs sur le site ainsi que l'examen final du plan de restauration. Ensuite, le démantèlement est complété par des équipes qui se chargent de

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

démonter toutes les installations et les équipements utilisés pour l'extraction et le traitement du minerai. Après le démantèlement, la restauration consiste à remettre en état les écosystèmes perturbés. La dernière étape de la fermeture d'une mine est la post-fermeture qui comprend la surveillance de la mise en place du plan de restauration et le suivi des travaux touchant le traitement des eaux contaminées. [8]

2.4 Objectifs de la fermeture

Les objectifs de fermeture d'une mine sont conçus conformément aux utilisations postérieures à l'exploitation minière suggérées. Selon l'autorité australienne de protection de l'environnement (EPA), les objectifs de fermeture d'un site minier sont groupés dans cinq axes principaux : la conformité, la forme de terrain, la revégétalisation, la faune, l'eau, et les infrastructures et déchets. [11]

2.5 Les trois étapes fondamentales du plan de fermeture

L'élaboration d'un plan de fermeture efficace se fait généralement en trois étapes fondamentales, qui correspondent aux différentes phases de la durée de vie de la mine et au niveau de détail requis. Ces étapes sont reconnues internationalement, notamment par l'ICMM.

Tableau 2.4 : Les trois étapes fondamentales du plan de fermeture

Étape	Plan élaboré	Objectif du plan	Durée de vie
01	Élaboration d'un plan de clôture conceptuel	Le plan est élaboré et utilisé au cours de l'exploration, de la pré faisabilité, de la conception et de la construction pour guider l'orientation des activités	3-5 ans
02	Élaboration et mise en œuvre d'un plan de clôture détaillé	Le plan permet de mieux comprendre les objectifs et les étapes spécifiques ainsi que les actions et les résultats des activités pour les atteindre	5-30 ans

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

03	La transition effective vers la fermeture de la mine	Mettre en œuvre un plan de déclassement et de post-fermeture (sa durée de vie peut se prolonger sur plusieurs années)	1-2 ans (peut se prolonger)
----	--	---	-----------------------------

2.6 Gestion des eaux de mine et drainage acide

La gestion de l'eau tout au long des phases du cycle d'une mine est tout aussi importante pour la fermeture que peut l'être la gestion des déchets miniers. Les eaux de mine, qu'elles proviennent des eaux de surface, des eaux souterraines ou des précipitations, peuvent être contaminées par une variété de polluants dont les plus problématiques sont les métaux lourds et l'acidité générée par l'oxydation des sulfures minéraux. Le drainage minier acide (DMA) ou drainage rocheux acide (DRA) constitue l'un des défis environnementaux les plus persistants et les plus coûteux de la fermeture des mines. [15]



Figure 2.1 : Exemple de drainage minier acide (DMA) — coloration orange caractéristique due à la présence de fer et d'autres métaux lourds

Le drainage minier acide se produit lorsque des minéraux sulfureux, principalement la pyrite (FeS_2), sont exposés à l'oxygène de l'air et à l'eau, provoquant une série de réactions chimiques qui génèrent de l'acide sulfurique et libèrent des métaux lourds dans la solution. Ce

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

phénomène peut persister pendant des siècles après la fermeture de la mine si des mesures préventives et curatives adéquates ne sont pas mises en place. [15]

Tableau 2.5 : Techniques de prévention et de traitement du drainage minier acide

Approche	Technique	Principe	Avantages	Limites
Prévention	Encapsulation	Isolation des matériaux sulfureux dans une enveloppe étanche	Efficacité à long terme, faible maintenance	Coût initial élevé, risque de rupture
Prévention	Recouvrement	Couverture des stériles par des matériaux imperméables	Réduction de l'infiltration d'oxygène et d'eau	Nécessite des matériaux de couverture en grande quantité
Prévention	Inondation	Submersion des vides miniers pour limiter l'oxydation	Efficace et peu coûteux	Risque de contamination des eaux souterraines
Prévention	Amendement alcalin	Ajout de carbonates pour neutraliser l'acidité potentielle	Traitement in situ, réduction du DMA	Quantité d'amendement souvent élevée
Traitement actif	Neutralisation chimique	Addition de chaux ou de soude pour élever le pH	Efficacité immédiate, contrôle précis	Coûts élevés, production de boues, maintenance
Traitement passif	Zone humide construite	Utilisation de plantes et de micro-organismes pour filtrer les polluants	Faible coût d'exploitation, esthétique	Espace requis, efficacité variable selon les saisons
Traitement passif	Drainage alcalin	Filtre de calcaire pour neutraliser l'acide	Simplicité, faible coût	Saturation du calcaire, nécessite le remplacement

2.7 Sécurité publique et gestion des risques post-fermeture

CHAPITRE II : ACTIVITÉS DE FERMETURE D'UNE MINE ET OBJECTIFS VISÉS

La sécurité du public et de la faune constitue un objectif fondamental de la fermeture des mines. Une fois fermé, le site minier doit être raisonnablement sûr pour les humains et la faune. Les pentes raides ou instables, les ouvertures de mines souterraines, les lacs de kettle, et les bâtiments industriels d'un site minier peuvent tous présenter des dangers potentiels.

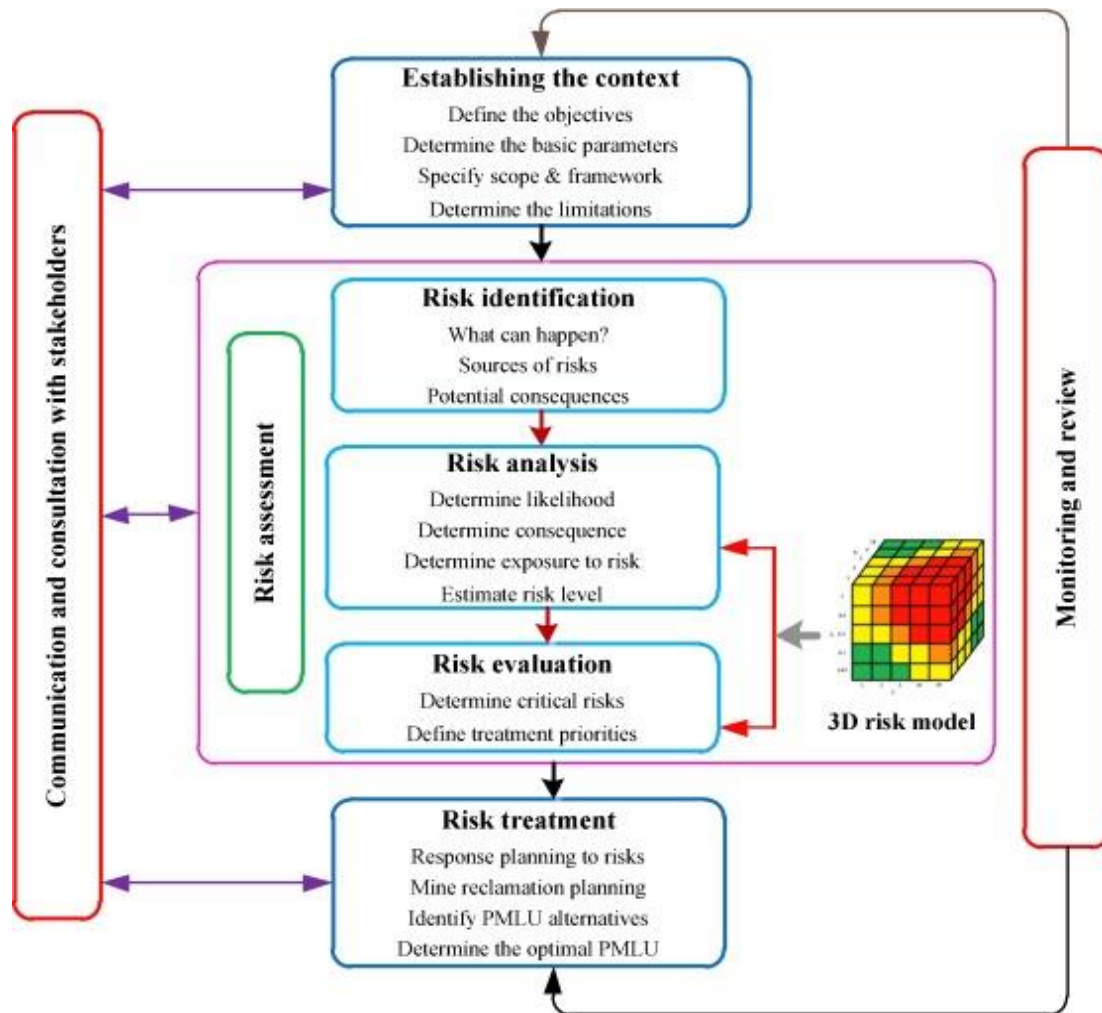


Figure 2.2 : Cadre de gestion des risques pour la fermeture des mines — approche intégrée basée sur le modèle 3D des risques

La gestion des risques fait partie intégrante de la planification d'une fermeture de mine. Une approche structurée de la gestion des risques durant la durée de vie de la mine peut permettre à une exploitation d'identifier les risques et de mettre au point des contrôles pour effectuer une fermeture, une réhabilitation et une rétrocession durables. [8]

2.8 Planification intégrée et conception pour la fermeture

L'élaboration des plans de fermeture doit débiter dès la phase de planification du projet de mine ou, dans le cas d'une mine existante, aussitôt que possible au cours du cycle de vie de la mine. Il faut prendre en considération et intégrer les plans de fermeture dans tous les aspects de la planification, de la construction et de l'exploitation de la mine afin de prévoir les aspects clés de la fermeture, et ce, tout au long du cycle de vie de la mine. [7]

La conception pour la fermeture (Design for Closure) est un concept qui doit guider toutes les décisions de planification et de conception de la mine. Il implique que chaque élément de l'infrastructure minière soit conçu en tenant compte de sa future démolition, démontage ou réutilisation. Cette approche réduit les coûts de fermeture, minimise les déchets et maximise les opportunités de réutilisation.

[7]

CHAPITRE III

**PLAN DE RESTAURATION ET
RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE**

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

La restauration et la réhabilitation écologique des sites miniers constituent des disciplines complexes qui visent à réparer les dommages causés par l'exploitation minière en rétablissant des écosystèmes fonctionnels et, dans la mesure du possible, autochtones. Ce chapitre examine les fondements du plan de restauration, les processus de restauration écologique, les techniques de stabilisation des sols, les méthodologies de réhabilitation et les considérations spécifiques aux mines souterraines.

3.1 Qu'est-ce qu'un plan de restauration ?

Un plan de restauration est un document technique déposé et approuvé par le gouvernement avant le début de l'exploitation, qui explique clairement la manière dont l'entreprise procédera au nettoyage et à la remise en état du site après la fin des travaux. Selon le Gouvernement du Canada (2006), ce plan doit être rédigé avant le début de l'exploitation et doit décrire en détail les actions que l'entreprise entreprendra pour restaurer le site minier une fois l'extraction terminée. [11]

3.2 Les processus de restauration écologique

3.2.1 Définitions selon la Society for Ecological Restoration (SER 2004)

La restauration écologique est définie comme le processus qui assiste l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. La SER la définit également comme « la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir l'écosystème considéré comme indigène et historique. Le but de cette intervention est de revenir à la structure, à la diversité et à la dynamique de cet écosystème. [12]

Tableau 3.1 : Terminologie de la restauration écologique des sites miniers

Terme	Définition	Objectif principal	Principales opérations
Restauration écologique	Processus assiste l'autoréparation d'un écosystème dégradé ; transformation intentionnelle pour rétablir l'écosystème indigène et historique	Retour à la structure, diversité et dynamique de l'écosystème préexistant	Remblayage d'une mine à ciel ouvert ; restauration des terres pour les rendre à l'agriculture

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

Réhabilitation (régénération)	Établissement d'un écosystème stable, mais pas nécessairement celui qui existait avant la mine	Conversion d'une zone à un état sûr et stable	Création de marais, revégétalisation, refuges fauniques
Remédiation	Nettoyage de la zone polluée à des niveaux sûrs en extrayant ou en isolant les contaminants	Isoler les matériaux contaminés dans des installations de stockage ; recouvrir les résidus de terre arable propre ; traiter l'eau de mine polluée	Isolation, recouvrement, traitement des eaux
Récupération (Reclamation)	Stabilisation du terrain, sécurité publique, amélioration esthétique, retour à un paysage utile dans un contexte régional	Retour à un paysage considéré comme utile sans obligation de retour à l'état originel	Stabilisation, sécurisation, aménagement paysager
Remplacement (Substitution)	Installation d'une végétation de substitution à la couverture végétale préexistante	Couverture végétale alternative adaptée aux nouvelles conditions	Plantation d'espèces résistantes, création de nouveaux habitats
Réaffectation	Transformation d'un écosystème par l'homme pour un nouvel usage sans relation avec l'écosystème préexistant	Nouvel état éventuellement sans relation de structure ou de fonctionnement avec l'écosystème préexistant	Espace mis en culture, zone industrielle, centre commercial
Revégétalisation	Reconstitution d'un couvert végétal d'un terrain dénudé par ensemencement, plantation ou colonisation naturelle	Couvert végétal adapté aux conditions du site, suffisamment diversifié	Ensemencement, plantation, colonisation naturelle

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

3.2.2 La réhabilitation progressive

La réhabilitation progressive est un processus de la durée de vie de la mine (LoM) permettant d'atteindre des objectifs d'utilisation des terres de l'après-mine. Elle est définie par l'ICMM comme englobant les efforts continus déployés tout au long de l'exploitation de la mine pour faire progresser les activités de fermeture pendant la construction et l'exploitation. [5]



Figure 3.1 : Réhabilitation progressive d'une mine à ciel ouvert — remise en état des talus et préparation des sols pour la revégétalisation

Tableau 3.2 : Les avantages de la réhabilitation progressive

Catégorie d'avantages	Description	Bénéficiaires
Réduction de l'empreinte	Réduction de l'« empreinte » globale non réhabilitée de la mine à tout moment de l'exploitation	Environnement, communautés locales
Facilité d'essais	Facilité de procéder à des essais sur les diverses options de réhabilitation et de faire preuve de résultats réussis à la communauté élargie	Opérateur, régulateurs, communautés

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

Démonstration d'engagement	Démonstration aux parties prenantes et aux employés d'un engagement selon lequel la mine possède un programme actif de réhabilitation minière et de fermeture	Parties prenantes, employés, investisseurs
Réduction des coûts	Réduction des coûts globaux de fermeture par étalement dans le temps et utilisation des ressources de l'exploitation	Opérateur, actionnaires
Réduction des risques	Réduction des risques d'échec et des responsabilités qui peuvent en découler grâce à l'expérience acquise	Opérateur, assureurs, communautés
Réduction des garanties	Réduction des « garanties financières » exigées par les autorités de régulation proportionnellement aux terres réhabilitées	Opérateur, trésorerie
Permis social	Renforcement du permis social d'exploitation par démonstration concrète de l'efficacité des technologies de fermeture	Communautés, autorités locales
Avantages fiscaux	Dans certaines juridictions, réductions d'impôts liées aux dépenses de réhabilitation effectuées pendant la période de production	Opérateur, fiscalité

3.3 Techniques de stabilisation des sols

La stabilisation des sols après une exploitation minière est essentielle pour éviter l'érosion et encourager la végétation. Les techniques de stabilisation doivent être adaptées aux conditions spécifiques du site, incluant la composition du sol, la pente du terrain, le climat local et les objectifs de réhabilitation retenus. [14]

La végétalisation constitue la technique de stabilisation la plus fondamentale. Elle utilise des plantes indigènes pour créer une couverture végétale qui retient le sol, prévient l'érosion éolienne et hydrique, et initie les processus de restauration écologique. L'application d'engrais

CHAPITRE III : PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

organiques représente une autre technique essentielle. Les engrais naturels enrichissent le sol dégradé par l'exploitation minière, favorisent la croissance des plantes et accélèrent la formation d'humus. [15]



Figure 3.2 : Stabilisation d'une halde de stériles par bio-ingénierie — couverture végétale complète après réhabilitation écologique

3.4 Méthodologies de réhabilitation écologique

Pour restaurer efficacement un site minier, les ingénieurs et les écologistes appliquent diverses méthodologies structurées qui garantissent une approche scientifique et systématique. La restauration réussie repose sur plusieurs étapes clés qui s'enchaînent de manière logique et itérative. [3]

L'analyse du site constitue la première étape indispensable. Elle consiste à étudier la faune, la flore et la composition du sol pour planifier la restauration. La modélisation écologique utilise des modèles mathématiques pour prédire la succession écologique et simuler les interactions espèces-environnement. L'élimination des contaminants représente une étape critique pour les sites fortement pollués. La création de corridors écologiques et la reconnexion des habitats fragmentés sont des actions essentielles pour restaurer la connectivité du paysage. [3]

3.5 Remise en état des mines souterraines

Les mines souterraines présentent des défis particuliers pour la fermeture et la réhabilitation en raison de la nature invisible des ouvrages miniers et des risques persistants associés aux

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

excavations souterraines. Les composantes en surface les plus courantes des mines souterraines sont les puits de mine, les monteries, les ouvertures à la surface des chantiers, les têtes de tunnels, les galeries à flanc de coteau, les descenderies et, parfois, des affaissements ou d'autres perturbations de la surface. [14]



Figure 3.3 : Obturation d'un puits de mine abandonné — utilisation d'un bouchon gonflable pour sceller l'accès de manière sécurisée

Tableau 3.3 : Techniques de scellement des ouvrages miniers souterrains

Type d'ouvrage	Technique de scellement	Matériaux utilisés	Considérations particulières
Puits de mine	Remblayage complet puis obturation par bouchon de béton	Résidus et stériles bénins, béton armé	Éviter le remblayage avec du bois (pourrissement = tassement) ; éviter les déblais (risque de vides)
Monteries	Bouchage avec béton ou enrochement sur une profondeur correspondant à deux fois la hauteur	Béton, acier, enrochement	Les barrières de bois conviennent uniquement aux fermetures temporaires

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

Galeries d'accès	Bloquage avec béton, acier ou enrochement ; effondrement d'une section de la galerie	Béton, acier, enrochement	Applicable lorsque la qualité de l'eau ne pose pas de problème
Galeries de ventilation	Bloquage définitif avec du béton	Béton	Les barrières de bois conviennent uniquement aux fermetures temporaires
Trous de forage	Scellement avec matériaux inertes	Ciment, bentonite, stériles	Tous les trous de forage doivent être scellés pour éviter les conduits de contamination
Chantiers miniers	Inondation et bouchage pour empêcher la production d'acide	Eau, matériaux inertes	La conception doit tenir compte des charges hydrostatiques et de la condition des masses rocheuses

3.6 Caractérisation des matériaux miniers et gestion des stériles

La caractérisation et la gestion complète des matériaux, y compris des sols et des stériles, tout au long de la durée de vie de la mine sont largement reconnues comme essentielles à la réhabilitation d'une mine, à sa fermeture et à l'utilisation des terres après l'exploitation minière. La caractérisation des matériaux des déchets miniers devrait débuter tôt, lors de la phase d'exploration.

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

Tableau 3.4 : Classification et gestion des matériaux miniers

Catégorie de matériau	Caractéristiques	Gestion pendant l'exploitation	Gestion à la fermeture
Sols végétaux	Couche superficielle fertile, riche en matière organique	Stockage séparé, protection contre l'érosion et la compaction	Réutilisation comme couche de fond pour la revégétalisation
Stériles inertes	Non polluants, non acido-générateurs, stables	Stockage en haldes ou remblayage dans les vides	Reprofilage, couverture, intégration dans le paysage
Stériles PAG	Potentiellement acido-générateurs, contenant des sulfures	Stockage isolé, encapsulation, traitement préventif	Encapsulation permanente, couverture imperméable, drainage contrôlé
Résidus miniers	Fins, souvent saturés, potentiellement toxiques	Stockage en parcs à résidus avec digues de confinement	Stabilisation des digues, couverture, déshydratation
Déchets dangereux	Produits chimiques, hydrocarbures, explosifs	Stockage sécurisé, traçabilité, élimination par des prestataires agréés	Élimination complète hors site, décontamination des zones affectées
Matériaux de démolition	Béton, acier, bois, plastiques	Tri sélectif, recyclage quand possible	Recyclage, enfouissement contrôlé, réutilisation

3.7 Revégétalisation et restauration des écosystèmes

La revégétalisation constitue l'étape finale et la plus visible de la réhabilitation des sites miniers. Elle vise à reconstituer un couvert végétal sur un terrain dénudé par l'action de l'homme, par ensemencement, plantation ou colonisation naturelle. Les espèces végétales utilisées devraient être adaptées aux conditions du site à revégétaliser et suffisamment diversifiées. [15]

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

La sélection des espèces pour la revégétalisation doit être fondée sur une analyse rigoureuse des conditions du site. Les facteurs à considérer incluent : le climat (température, précipitations, ensoleillement) ; la nature du substrat (granulométrie, pH, teneur en nutriments, présence de contaminants) ; la topographie (pente, exposition, drainage) ; et les objectifs de réhabilitation (stabilisation des sols, restauration de l'écosystème, création d'habitats fauniques, production agricole ou forestière). [15]

3.8 Innovations et technologies émergentes en réhabilitation minière

Le domaine de la réhabilitation des sites miniers connaît des avancées technologiques significatives qui offrent de nouvelles perspectives pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et accélérer la restauration des écosystèmes. Ces innovations touchent à la fois les techniques de caractérisation, les méthodes de traitement des contaminants, les approches de revégétalisation, et les outils de surveillance. [11]

La télédétection et les drones constituent des outils révolutionnaires pour le suivi de la réhabilitation. Les images satellites à haute résolution permettent de cartographier l'évolution de la couverture végétale sur de grandes surfaces. La bioremédiation avancée exploite les capacités des micro-organismes, des champignons et des plantes pour décontaminer les sols et les eaux. Les géosynthétiques et les matériaux innovants de confinement améliorent la performance des systèmes de couverture des stériles et des résidus. La biochar, un charbon de bois produit par pyrolyse de la biomasse, représente une innovation prometteuse pour la réhabilitation des sols miniers. [11]

3.9 Considérations particulières pour les mines d'uranium et les sites radioactifs

Les mines d'uranium et les sites miniers contenant des matériaux radioactifs naturels présentent des défis de fermeture et de réhabilitation spécifiques qui dépassent les considérations classiques des mines métalliques ou des carrières. La radioactivité naturelle des minerais d'uranium et de thorium, ainsi que des sous-produits comme le radium, impose des mesures de confinement et de surveillance particulières qui peuvent s'étendre sur des centaines, voire des milliers d'années. [11]

La préparation d'un plan de gestion des radiations pour compléter le plan de fermeture est exigée pour la fermeture des mines d'uranium. Ce plan doit comprendre un programme de

CHAPITRE III :PLAN DE RESTAURATION ET RÉHABILITATION ÉCOLOGIQUE

suivi et de surveillance permanents à mettre en place une fois que la fermeture aura été réalisée de manière satisfaisante. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) fournit des lignes directrices détaillées pour la gestion des déchets radioactifs miniers.

[11]

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

L'étude de cas internationaux permet d'illustrer concrètement les concepts théoriques exposés dans les chapitres précédents et de démontrer les multiples possibilités de reconversion des sites miniers. Ce chapitre présente des exemples emblématiques de mines épuisées reconverties avec succès, des cas de fermeture progressive en cours d'exploitation, et des considérations spécifiques aux mines à ciel ouvert. Les images réelles des sites étudiés sont intégrées pour renforcer la compréhension visuelle de ces reconversions.

4.1 Cas des mines épuisées dans le monde

Les mines épuisées qui ont fait l'objet d'une reconversion réussie démontrent que la fermeture d'une mine peut constituer une opportunité de création de valeur plutôt qu'une simple obligation réglementaire. Ces exemples internationaux illustrent la diversité des usages post-miniers possibles, allant du tourisme à la recherche scientifique, en passant par la conservation de la biodiversité et le développement culturel. [2]

4.1.1 Mine de sel de Turda (Roumanie) — Reconversion en parc d'attractions

La Roumanie compte plus de 1 500 mines de sel à ciel ouvert, dont beaucoup sont aujourd'hui abandonnées. La Salina Turda se distingue comme la plus attractive d'entre elles, ayant été reconvertie en parc d'attractions souterrain de plus d'une centaine de mètres de profondeur. Ce site exceptionnel abrite un complexe d'attractions et de jeux ouvert toute l'année, comprenant des lacs souterrains navigables, des stalagmites impressionnantes dans des galeries souterraines historiques, et des installations de loisirs modernes intégrées dans le cadre minier préservé. [2]

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES



Figure 4.1 : Salina Turda (Roumanie) — Vue aérienne du parc d'attractions souterrain avec lac navigable et installations de loisirs



Figure 4.2 : Salina Turda — Intérieur de la mine de sel reconvertie avec tables de billard et aménagements touristiques

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

L'exemple de Salina Turda démontre comment une ancienne mine industrielle peut être transformée en destination touristique de classe mondiale, générant des revenus durables pour la région et préservant le patrimoine industriel. La reconversion a nécessité une restauration minutieuse des structures souterraines, la mise en sécurité des galeries, l'aménagement d'installations touristiques respectueuses de l'intégrité du site, et le développement d'une offre culturelle et éducative autour de l'histoire de l'extraction du sel. [2]

4.1.2 Quarry Hotel (Chine) — Hôtel cinq étoiles dans une carrière

Le Quarry Hotel, également connu sous le nom de « InterContinental Shanghai Wonderland », est le premier hôtel cinq étoiles au monde construit dans une carrière remplie d'eau. Achievé avec succès et ouvert au public en 2018, il est considéré comme l'un des endroits les plus respectueux de l'environnement pour séjourner en Chine. L'hôtel est construit dans une ancienne carrière de grès de 88 mètres de profondeur, près de Shanghai, et intègre deux niveaux sous le niveau de l'eau. [2]



Figure 4.3 : InterContinental Shanghai Wonderland (Chine) — Vue nocturne de l'hôtel cinq étoiles intégré dans l'ancienne carrière avec cascade et lac artificiel



Figure 4.4 : InterContinental Shanghai Wonderland — Vue panoramique nocturne montrant l'intégration architecturale dans les parois de la carrière

Ce projet architectural d'envergure démontre que les sites miniers dégradés peuvent accueillir des développements de grande qualité qui conjuguent innovation technologique, respect environnemental et création économique. La conception a dû prendre en compte la stabilité des parois de la carrière, la gestion de l'eau, la préservation de la biodiversité locale, et l'intégration harmonieuse du bâtiment dans le paysage. [2]

4.1.3 Eden Project (Royaume-Uni) — Centre de formation écologique

L'Eden Project est un complexe environnemental bâti en 2001 dans une ancienne carrière de kaolin au Royaume-Uni, près de St Austell en Cornouailles. Le site comprend deux immenses serres biomiques dont la structure extérieure est constituée d'un matériau plastique transparent très résistant (ETFE). Chaque serre abrite un écosystème reproduisant fidèlement : le climat tropical humide d'une part, et le climat chaud et sec de type méditerranéen d'autre part. [11]

L'Eden Project illustre le thème « Écosystèmes et développement durable » et constitue un exemple remarquable de réhabilitation écologique avancée. Au-delà de sa dimension

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

touristique, le site est un centre de recherche, d'éducation et de sensibilisation aux enjeux environnementaux mondiaux. Le succès de l'Eden Project a inspiré de nombreux projets similaires à travers le monde. [11]

4.1.4 Jardin botanique (Colombie-Britannique, Canada)

En Colombie-Britannique, au Canada, une ancienne carrière de marbre a été reconvertie en arboretum et en centre de recherche botanique. Cette transformation illustre la possibilité de retour à un usage proche de l'état naturel originel, conformément au concept de restauration écologique sensu stricto. Le site abrite désormais une collection diversifiée d'espèces végétales indigènes et exotiques, des programmes de recherche sur la restauration écologique, et des activités éducatives pour le public. [2]

4.2 Cas des mines en activité — Fermeture progressive

La fermeture progressive constitue l'approche moderne et recommandée par l'ICMM pour la gestion de la fin de vie des mines. Contrairement à la fermeture différée qui reporte l'ensemble des travaux de réhabilitation à la fin de l'exploitation, la fermeture progressive intègre ces activités dans le cycle opérationnel normal de la mine. [5]

Tableau 4.1 : Synthèse des avantages de la fermeture progressive

Dimension	Avantage	Impact mesurable
Social	Renforcement du permis social d'exploitation	Réduction des conflits sociaux de 40-60%
Technique	Test et validation des techniques de réhabilitation	Amélioration du taux de succès de la revégétalisation de 25-35%
Financier	Réduction du passif de fermeture	Diminution des provisions financières de 15-30%
Réglementaire	Réduction des garanties financières	Libération de trésorerie pour réinvestissement
Fiscal	Avantages fiscaux liés aux dépenses de réhabilitation	Économies d'impôt de 10-20% sur les dépenses éligibles
Environnemental	Réduction de l'empreinte écologique	Diminution de 50-70% de la surface perturbée à la fin de l'exploitation

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

Risque	Réduction des risques d'échec et de responsabilité	Baisse des coûts d'assurance et des provisions pour contentieux
--------	--	---

4.3 Cas des mines à ciel ouvert épuisées

Les mines à ciel ouvert épuisées présentent des caractéristiques géomorphologiques et environnementales spécifiques qui conditionnent les options de réhabilitation et de reconversion. Les fosses abandonnées peuvent se remplir d'eau et former des lacs artificiels, les haldes de stériles constituent des reliefs anthropiques dominants dans le paysage, et les vastes surfaces dénudées nécessitent des approches de réhabilitation à grande échelle. [4]

Tableau 4.2 : Aspects à prendre en compte dans le plan de fermeture d'une mine à ciel ouvert

Element	Aspects à prendre en considération	Techniques de mitigation
Stabilité des talus	Risques d'éboulement, érosion des pentes, instabilité des bancs	Reprofilage des pentes, terrassement, drainage des eaux, revêtements de protection
Gestion des eaux	Eaux souterraines, eaux pluviales, niveau de la nappe, inondation potentielle	Pompage, drainage, barrages, bassins de décantation, traitement des eaux
Sécurité publique	Accès non autorisé, risques de chute, noyade, piégeage	Clôtures, signalisation, obturation des accès, aménagement de zones sécurisées
Faune	Piégeage dans la fosse, perte d'habitat, corridors de migration coupés	Ramps de sortie pour animaux, création de nouveaux habitats, corridors écologiques
Drainage minier	Lixiviation des métaux, acidification, sédimentation	Couvertures imperméables, systèmes de collecte, traitement passif et actif
Halles de stériles	Stabilité, production de poussières, apparence visuelle	Reprofilage, couverture végétale, encapsulation, aménagement paysager

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

Parcs à résidus	Stabilité de la digue, modifications géochimiques, exfiltration	Surveillance géotechnique, couverture, drainage, gestion de la sédimentation
-----------------	---	--

4.4 Analyse comparative des cas d'étude

L'analyse comparative des études de cas présentées permet d'identifier les facteurs communs de succès et les leçons transposables au contexte algérien. Cette analyse s'appuie sur une grille d'évaluation multicritères qui examine chaque cas selon les dimensions technique, environnementale, socio-économique, financière et institutionnelle. [4]

Tableau 4.3 : Analyse comparative des études de cas

Critère	Salina Turda (Roumanie)	Quarry Hotel (Chine)	Eden Project (UK)	Jardin botanique (Canada)
Type de mine	Mine de sel souterraine	Carrière de grès à ciel ouvert	Carrière de kaolin	Carrière de marbre
Utilisation post-mine	Parc d'attractions souterrain	Hôtel de luxe	Centre environnemental et serres	Arboretum et recherche
Investissement initial	Modéré (rénovation des galeries)	Très élevé (construction neuve)	Élevé (infrastructures innovantes)	Modéré (aménagement paysager)
Retour sur investissement	Élevé (tourisme durable)	Élevé (tourisme de luxe)	Élevé (tourisme + recherche)	Modéré (recherche + éducation)
Emplois créés	100-200 directs	300-500 directs	200-400 directs	50-100 directs
Impact environnemental net	Positif (préservation du patrimoine)	Mitigé (construction intensive)	Positif (conservation + éducation)	Positif (restauration écologique)
Implication communautaire	Forte (identité régionale)	Modérée (projet privé)	Forte (partenariats locaux)	Forte (bénévoles + éducation)
Durabilité	Très élevée (patrimoine unique)	Élevée (destination prisée)	Très élevée (mission éducative)	Élevée (recherche continue)

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

4.5 Perspectives pour les mines en activité en Algérie

L'Algérie compte plusieurs mines en activité qui approchent de la fin de leur durée de vie ou qui pourraient bénéficier d'une planification de fermeture anticipée. Les mines de fer de Ouenza et de Djebel Anini, les mines de phosphate de Djebel Onk, les carrières de marbre de Filfila, et les mines de sel de Hassi Bahbah sont parmi les sites les plus emblématiques. Pour chacun de ces sites, une planification précoce de la fermeture pourrait transformer un défi en opportunité.

La mine de fer de Ouenza, exploitée depuis plusieurs décennies, a généré des volumes importants de stériles et a modifié profondément le paysage. La fermeture progressive de cette mine pourrait inclure : la réhabilitation des haldes de stériles en vue d'une utilisation future (loisirs, agriculture, forêt) ; la gestion des eaux de drainage pour prévenir la contamination ; la préservation des infrastructures (routes, lignes électriques) pour la communauté locale ; et la formation des travailleurs à de nouvelles compétences.

La mine de phosphate de Djebel Onk, l'une des plus grandes d'Afrique, présente des enjeux spécifiques liés à la nature des résidus phosphatés et à la taille de la fosse à ciel ouvert. Les carrières de marbre de Filfila pourraient suivre un modèle de « géotourisme » en préservant les faces de taille comme témoignage de l'histoire industrielle. Les mines de sel de Hassi Bahbah pourraient suivre l'exemple de la Salina Turda en Roumanie avec une reconversion vers un usage touristique et culturel.

4.6 Les mines épuisées en Algérie

Tableau 4.4 : : TABLEAU RECAPITULATIF DES PRINCIPALES MINES ABANDONNEES EN ALGERIE

Site minier	Wilaya	Minerai principal	Periode d'exploitation	Annee de fermeture
Sidi-Kamber	Skikda	Pb-Zn-Ba	1890-1984	1984
Ain-Barbar	Annaba/Skikda	Cu-Zn-Pb	Avant 1867-1984	1984

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

El-Kouif	Tebessa	Phosphate	1890-1966	1966
Kenadsa	Bechar	Charbon	1917-?	Après 1961
Kherzet Youcef	Setif	Pb-Zn	Avant 1990	1990 (accident)
Chaabet El-Hamra	Setif	Zn	1992-?	Active puis abandonnée
Ichmoul	Batna	Pb-Ba	1932-1954	1954
Mesloula	Tebessa	Pb-Zn	Avant 1962	1962
El-Abed	Tlemcen	Zn-Pb	Jusqu'en 2003	2003
District d'Azzaba	Skikda	Hg	1971-2005	2005

4.6.1 La mine de Sidi-Kamber

La mine de Sidi-Kamber, située à 60 km de Skikda sur une superficie de 2 271 hectares, constitue le cas d'étude le plus documenté. Abandonnée depuis 1979 après une exploitation industrielle intense (1890-1976 pour le Pb-Zn, puis 1976-1984 pour la barytine à ciel ouvert), elle continue de polluer l'Oued Es-Souk et le barrage de Guénitra situé à 2 km en aval.[20]

Paramètre	Données
Localisation	60 km de Skikda, 40 km N de Constantine
Superficie	2 271 hectares (concession de 1889)
Minerais	Galène (PbS), Blende (ZnS), Barytine, Pyrite
Période d'exploitation	1890-1976 (Pb-Zn) ; 1976-1984 (barytine)

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

La thèse de doctorat de Khelfaoui Malika (2021) démontre que les sédiments du barrage de Guénitra présentent une contamination élevée par le plomb, tandis que le zinc demeure principalement à l'état dissous dans l'eau. L'analyse statistique multivariée (ACP, CHA, ANOVA) révèle deux origines distinctes de pollution : sources anthropiques (Cu, Mn, Hg, Pb des résidus de traitement) et sources lithogéniques anthropiques (Ni, Zn, Cr, Fe). [20]



Figure 4.5 : Localisation de la mine de Sidi-Kamber et vue du site abandonné — Contexte géographique et état actuel des installations minières désaffectées.



CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

Figure 4.6 : Impacts environnementaux visibles sur le paysage et les sols avoisinants la mine de Sidi-Kamber — Dégradation de la végétation et contamination des sols. [20]

4.6.2 Cas de la mine de phosphates d'El-Kouif (Tébessa)

Centre minier créé par arrêté du 27 septembre 1905 dans le douar éponyme de la Commune mixte de Morsott, la mine de phosphates d'El-Kouif a été découverte en 1873 par Philippe Thomas, vétérinaire militaire. L'exploitation en galeries souterraines a débuté en 1893, avec un pic de production de 41 348 tonnes en 1898. Le minerai était acheminé au port de Bône par chemin de fer à vapeur dès 1893, puis par la première ligne électrifiée d'Afrique du Nord (1932-1951). [21]

Le gisement, en voie d'épuisement en 1966, a été remplacé par le Djebel Onk. Les cavités souterraines, liées à un réseau karstique complexe développé sur plus de 52 ans d'exploitation, présentent un risque géotechnique majeur pour les constructions modernes s'implantant à proximité. L'impact environnemental global est qualifié de « négligeable » dans les études disponibles, mais la présence de cavités et de vides souterrains nécessite impérativement un programme de réhabilitation préventive.[21]

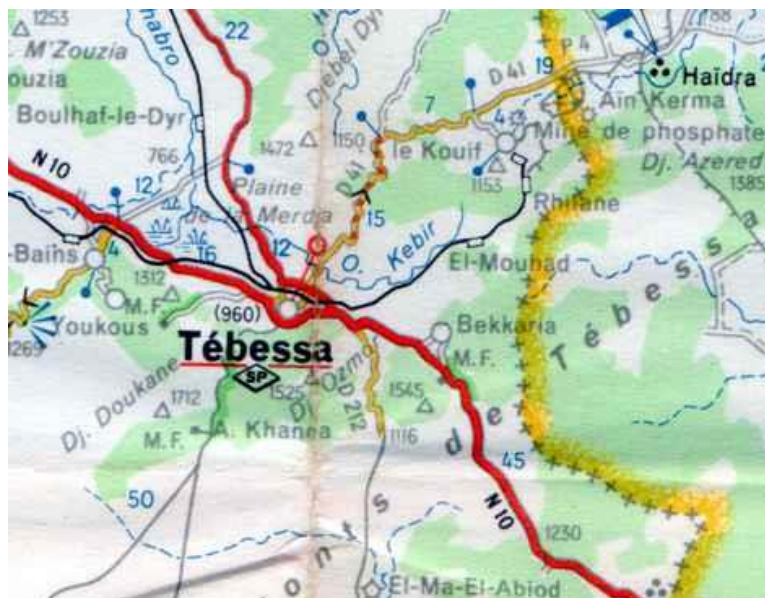


Figure 4.7 : Carte historique de la région d'El-Kouif — Situation géographique du centre minier de phosphates dans le contexte de la wilaya de Tébessa.

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

4.6.3 . Les mines de charbon de Kenadsa (Béchar)

Colomb-Béchar, petite ville située aux contreforts de l'Atlas saharien à 1 130 km d'Alger, abritait les mines de charbon de Kenadsa découvertes en 1917 par l'infanterie coloniale. La production maximale a été atteinte en 1950 avec 1 100 tonnes par jour. La fermeture de ces mines a laissé des vestiges industriels significatifs (lavoir, triage) et un patrimoine historique témoignant de l'activité charbonnière dans le Sahara algérien. La population de 30 000 habitants (dont 5 000 Européens en 1961) a connu un déclin économique marqué après la cessation de l'exploitation minière.[22]



Figure 4.8 : Vestiges industriels de la mine de charbon de Kenadsa — Structure métallique du lavoir et installations de triage abandonnées dans le paysage saharien.



Figure 4.9 : Photographie historique du lavoir et triage du charbon à Kenadsa — Archives de l'ECPAD, témoignant de l'activité industrielle minière dans la région de Colomb-Béchar

4.6.4. La mine de Chaabet El-Hamra (Sétif)

Située à 250 km au Sud-Est d'Alger et 50 km au Sud de Sétif, la mine de Chaabet El-Hamra exploite un gisement de zinc connu depuis 1910. Les méthodes d'exploitation retenues sont les chambres et piliers pour les épaisseurs inférieures à 5 m, et les sous-niveaux foudroyés pour les épaisseurs supérieures. La digue de résidus de flottation contient des éléments traces métalliques (As, Cd, Cu, Pb, Zn) sous forme de sulfures associés à la pyrite. Les tests de lixiviation menés en 2007 démontrent l'instabilité chimique des rejets et le risque de DMA, partiellement neutralisé par les dolomites présentes dans les stériles.[23]

Une méthode alternative proposée par le bureau canadien SIDAM — l'abattage par chambres et piliers avec remblayage par les rejets stériles de l'usine de traitement — n'a pas été retenue en raison de son coût élevé. Cette méthode aurait pourtant permis une récupération totale des réserves, une sécurité maximale et un salissage presque nul, illustrant les compromis économiques qui ont prévalu sur les considérations environnementales[23]

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

4.7 Les mines et les carriers en activité en Algérie

4.7.1 Cas de Djebel Onk (Tebessa) :

La mine de Djebel Onk, découverte en 1906-1907 par L. Joleau dans la wilaya de Tébessa au sud-est de l'Algérie et effectivement exploitée à partir de 1965 après soixante ans de délai dus aux contraintes technico-économiques, constitue le plus grand gisement de phosphate du pays avec des réserves totales estimées à 2,8 milliards de tonnes titrant 24% de P_2O_5 , soit environ la moitié des réserves phosphatées nationales ; sa formation géologique d'âge éocène (Lutétien/Thanétien) se caractérise par une couche phosphatée principale de 30 à 35 mètres subdivisée en trois sous-couches (basale, principale et sommitale) aux teneurs variables, et son exploitation s'effectue sur plusieurs quartiers dont Djemi-Djema (214 millions de tonnes à ciel ouvert), Kef Essenoun (187 millions de tonnes), Bled El-Hadba (799 millions de tonnes combinées à ciel ouvert et souterrain) et Oued Bétita (175 millions de tonnes souterraines), le tout soutenu par une infrastructure industrielle comprenant une usine de traitement d'une capacité de 800 000 à 1,4 million de tonnes par an, une voie ferrée de 95 km vers Tébessa et une cité minière de 650 logements, tandis que la durée de vie du gisement est estimée à environ **deux siècles** au rythme actuel de production, une pérennité renforcée par le partenariat stratégique algéro-chinois de 2022 (ACFC, 7 milliards de dollars) visant à porter la production à 5,4 millions de tonnes d'engrais annuels.[24]

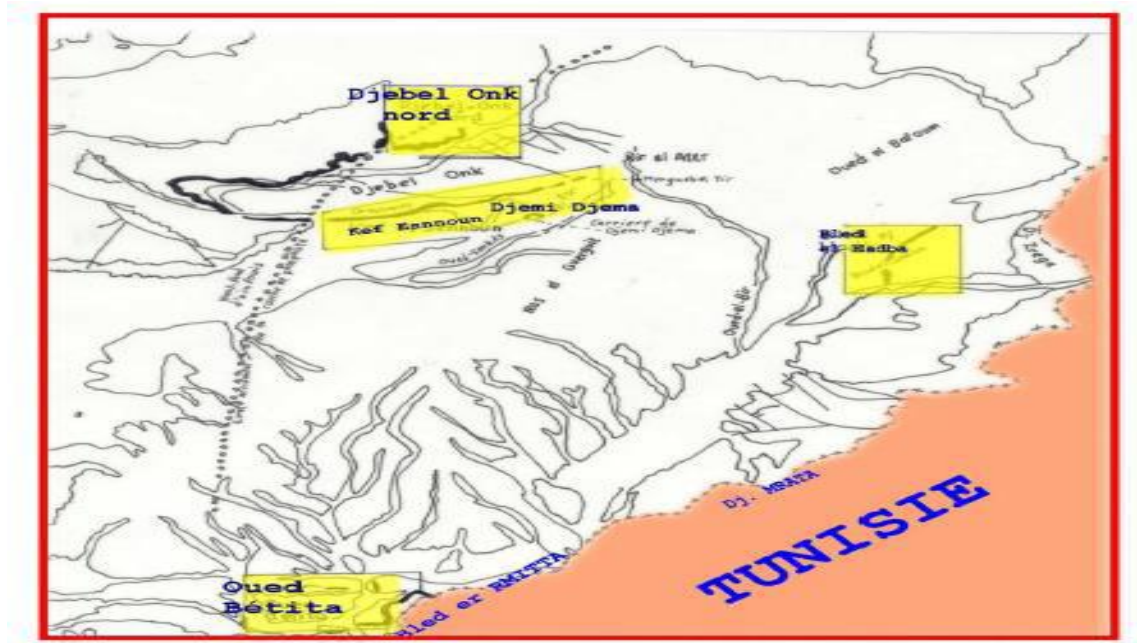


Figure 4.10 : Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk (D' après Prian et Cortial, 1993)

4.7.2 Cas Boukhadra

La mine de Boukhadra, découverte et prospectée entre les années 1950 et 1970 dans la wilaya de Tébessa à l'extrême Nord-Est de l'Algérie (45 km au nord de Tébessa, 47 km de l'Ouenza et 13 km de la frontière tunisienne), constitue un gisement majeur de fer encaissé dans les calcaires Albo-Aptiens d'un anticlinal d'orientation NE-SO avec cœur triasique, caractérisé par une genèse hydrothermale primaire (sidérite) et une oxydation supergène secondaire (hématite) au-dessus du niveau hydrostatique (côte 818 m), avec des réserves totales estimées à 57 millions de tonnes de minerai titrant 54% de fer réparties en quatre corps minéralisés — le corps principal (300 m de longueur, 70 m de puissance), le corps Nord (800 m de longueur), le corps médian (500 m de longueur) et le corps Sud qui renferme à lui seul 64% des réserves globales (~36,5 Mt) — et dont l'exploitation combine une carrière à ciel ouvert sur la partie occidentale (BK I et BK II) et une exploitation souterraine par la méthode des sous-niveaux abattus sur cinq étages de 60 m de hauteur (niveaux 1285 à 1045 m) avec une galerie principale de 800 m de longueur et une section de 12 m², le tout soutenu par une ligne ferroviaire de Chenia à Boukhadra raccordée au complexe sidérurgique d'El Hadjar (190 km au nord) ; la durée de vie résiduelle du gisement est estimée à plusieurs décennies au rythme

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

actuel, bien que des périodes de sous-exploitation et des arrêts sociaux aient affecté la continuité de la production, tandis que les défis géotechniques liés à la création de vides souterrains d'environ 1,5 million de m³ nécessitent l'adoption de méthodes modernes de remblayage retardé pour assurer la stabilité structurale et la sécurité des travaux, dans un contexte de relance stratégique du secteur minier ferreux algérien visant à diversifier l'économie nationale. [25]



Figure 4.11 : Entrée de la mine souterraine de Boukhadra et vue panoramique de la carrière à ciel ouvert

4.7.3 Cas de EL Ouenza

a mine de l'Ouenza, découverte et exploitée depuis l'Antiquité romaine (vestiges de galeries de cuivre au quartier Douamis) mais modernisée à partir de 1901 lorsque le géologue français Pascal obtint la concession du Djebel Ouenza, a vu sa production effective débuter en 1921

CHAPITRE IV :ÉTUDE DES CAS PRATIQUES

avec la création de la Société de l'Ouenza au capital de 114 millions de francs et le raccordement ferroviaire Ouenza-Oued Keberit, avant d'être nationalisée en 1966 puis intégrée à FERPHOS en 1983, constitue le plus grand gisement de fer d'Algérie situé dans la wilaya de Tébessa à 90 km au nord du chef-lieu et 120 km au sud-sud-est d'Annaba, avec un massif culminant à 1 288 m d'altitude s'étendant sur 12 km de longueur et 5 km de largeur, encaissé dans les calcaires à miliolites de l'Aptien d'un anticlinal dissymétrique NE-SO structuré par le diapirisme triasique et caractérisé par une genèse périapiroclastique hydrothermale primaire (sidérite et ankerite) suivie d'une oxydation supergène en hématite avec des teneurs de 50 à 60% de fer, 2% de manganèse et des impuretés très faibles (0,005% P, 0,03% S), offrant des réserves totales de 120 à 150 millions de tonnes réparties en mamelons elliptiques alignés le long de l'« axe du 6 mai » comprenant les quartiers de Coudiat Douamis, Coudiat Hallatif, les Conglomérats, Sainte-Barbe, Chagoura Nord et Sud, Coudiat Zerga, Koudiat el Kahkhouh, Mrah el Maiz, Souda et Dubordieu, tous exploités à ciel ouvert avec un recouvrement stérile faible, soutenus par une infrastructure comprenant un système de skip (1967-1970), une voie ferrée électrifiée vers Annaba avec quai de 400 m et capacité de stockage d'un million de tonnes, ainsi qu'une cité minière complète (écoles, groupe médical, économat, logements) ayant employé jusqu'à 4 000 personnes, tandis que la production a culminé à 2,14 millions de tonnes en 1951 (60% du fer algérien) et se maintient actuellement à 2-2,5 millions de tonnes par an, donnant au gisement une durée de vie résiduelle estimée à 50 à 75 ans, dans un contexte de relance stratégique du secteur minier ferreux algérien visant à diversifier l'économie nationale malgré les défis historiques de sous-exploitation et les impacts environnementaux documentés par les études académiques récentes.[26]



Figure 4.12 : image représente une vue panoramique des mines de fer d'Ouenza en Algérie, probablement prise vers les années 1950.

4.8 Analyse des échecs de fermeture et leçons apprises

L'analyse des échecs de fermeture est tout aussi instructive que l'étude des succès. De nombreux sites miniers à travers le monde, particulièrement dans les pays en développement, témoignent d'une planification insuffisante, d'un financement défaillant, et d'une absence de suivi post-fermeture. Ces « mines orphelines » ou sites abandonnés représentent un fardeau environnemental, social et financier qui pèse sur les générations présentes et futures.

Selon le PNUE, la majorité des mines qui ont fermé en Afrique au cours des dix dernières années ont fait l'objet de fermeture imprévue et non planifiée. Les conséquences sont dramatiques : les ouvertures de mine laissées sans surveillance présentent des dangers physiques pour les personnes ; les dépôts ouverts de résidus miniers peuvent avoir des conséquences sur l'environnement ; la végétation met du temps à se rétablir et la biodiversité peut être affaiblie de manière permanente ; et les conséquences sociales négatives peuvent perdurer pendant des décennies.[27]

4.9 Innovations dans la reconversion des sites miniers

Au-delà des études de cas classiques présentées précédemment, de nouvelles formes de reconversion des sites miniers émergent à travers le monde, portées par les technologies numériques, les préoccupations climatiques, et la créativité des communautés.

L'agrivoltaïsme sur les sites miniers consiste à installer des panneaux solaires photovoltaïques sur les terres réhabilitées des mines, en combinant production d'électricité et agriculture. Les parcs éoliens sur les haldes de stériles exploitent la topographie élevée et les vents dominants des zones minières. Les sites de stockage de carbone (CCS) dans les vides miniers souterrains peuvent servir de réservoirs géologiques pour le stockage sécurisé du dioxyde de carbone. Les centres de données dans les mines souterraines exploitent les caractéristiques naturelles des excavations profondes : température stable, sécurité physique, et isolation des perturbations extérieures.[27]

CHAPITRE V

**ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET
FINANCIERS DE LA FERMETURE**

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

La fermeture d'une mine engendre des répercussions socio-économiques profondes qui dépassent largement le cadre technique et environnemental. Ce chapitre examine les dimensions sociales de la transition post-mine, les mécanismes de financement de la fermeture, et les structures de gouvernance nécessaires pour assurer une fermeture responsable et durable.

5.1 Transition socio-économique

La fermeture responsable d'une mine nécessite la participation active des communautés locales dans la planification et la mise en œuvre des actions afin que des profits durables puissent être reconnus. L'expérience internationale démontre que l'approche intégrée présente des avantages mutuels pour les entreprises minières et les communautés hôtes. [7]

L'impact sur les communautés locales est multidimensionnel. La perte d'emplois directs et indirects constitue la conséquence la plus immédiate et visible de la fermeture d'une mine. Dans les régions où l'exploitation minière constitue l'employeur principal, la fermeture peut entraîner un chômage de masse, une dépopulation, et une dégradation des services publics. La réduction des revenus fiscaux et des royalties perçus par les collectivités territoriales compromet leur capacité à maintenir les infrastructures et les services sociaux. [7]

5.2 Financement de la fermeture

Le financement adéquat de la fermeture et de la réhabilitation des mines constitue un préalable indispensable à une fermeture réussie. L'absence de ressources financières suffisantes est l'une des principales causes d'échec de la remise en état des sites miniers et de la persistance des « mines orphelines ». [7]

5.2.1 Provision pour réhabilitation (Algérie)

La nouvelle Loi minière algérienne n° 25-12 du 3 août 2025 introduit une disposition fiscale majeure : la provision pour réhabilitation et remise en état des lieux. Cette provision permet au titulaire d'un titre minier de soustraire à l'impôt une partie de son bénéfice imposable pour financer les travaux de réhabilitation et prendre en charge les effets de l'après-mine. Cette mesure incitative vise à encourager les opérateurs à prévoir financièrement la fermeture dès les premières phases de l'exploitation. [1]

5.2.2 Garantie financière

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

La garantie financière constitue le mécanisme de sécurité le plus répandu internationalement pour assurer l'exécution des travaux de réhabilitation décrits dans un plan de fermeture. Elle doit être fournie en même temps que le plan de fermeture et équivaloir aux coûts prévus des travaux de réhabilitation. Cette garantie est conservée en fiducie par l'autorité de régulation jusqu'à l'achèvement satisfaisant des travaux et la certification de la rétrocession du site. [1]

5.2.3 Estimation des coûts de fermeture

L'estimation des coûts de fermeture est une activité complexe qui nécessite une expertise multidisciplinaire et une connaissance approfondie du site. Les coûts doivent inclure toutes les activités de démantèlement, de remédiation, de réhabilitation, de surveillance post-fermeture, et de gestion des eaux et des résidus. Il est recommandé d'inclure une marge de contingence de 10% minimum pour tenir compte des imprévus, conformément aux normes comptables internationales (IFRS). [7]

5.3 Gouvernance et institutions

La gouvernance de la fermeture des mines implique la coordination de multiples acteurs aux rôles et responsabilités distincts mais complémentaires. Une structure institutionnelle claire et des mécanismes de concertation efficaces sont indispensables pour assurer la cohérence des actions et la responsabilisation de chaque partie prenante.

Tableau 5.1 : Rôles et responsabilités des acteurs de la fermeture

Acteur	Responsabilités principales	Pouvoirs et moyens
Autorité de contrôle et de régulation	Examen et approbation des plans de fermeture ; surveillance réglementaire ; certification de la rétrocession ; application des sanctions en cas de non-conformité	Pouvoir d'inspection, de suspension de permis, d'amende et de poursuite judiciaire

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

Services techniques de l'administration	Suivi de terrain ; évaluation des performances environnementales ; vérification du respect des normes ; conseil technique aux opérateurs	Accès aux sites, pouvoir de prélèvement d'échantillons, expertise scientifique
Entreprise minière	Mise en œuvre du plan de fermeture ; financement des travaux ; reporting régulier ; consultation des parties prenantes ; remise en état conforme aux engagements	Ressources financières, humaines et techniques ; responsabilité légale et civile
Communautés locales	Participation aux consultations ; expression des besoins et attentes ; contribution au suivi citoyen ; appropriation du site réhabilité	Droit à l'information, droit de participation, recours en cas de préjudice
Experts externes et consultants	Évaluation indépendante des plans ; audit technique et environnemental ; conseil aux autorités et aux communautés ; recherche et innovation	Expertise spécialisée, indépendance, crédibilité scientifique
Organisations de la société civile	Veille environnementale ; sensibilisation du public ; plaidoyer pour le renforcement des normes ; assistance aux communautés	Mandat représentatif, accès aux médias, capacité de mobilisation

5.4 Mécanismes de financement internationaux comparés

La comparaison internationale des mécanismes de financement de la fermeture des mines révèle une grande diversité d'approches, chaque pays ayant développé des solutions adaptées à son contexte juridique, économique et institutionnel. L'examen de ces mécanismes offre des références précieuses pour l'amélioration du cadre algérien.

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

Tableau 5.2 : Comparaison des mécanismes de financement de la fermeture des mines

Pays	Mécanisme principal	Montant de la garantie	Révision	Incitation à la réhabilitation progressive	Gestion des mines orphelines
Canada (Ontario)	Garantie financière en fiducie	100% des coûts estimés	À la demande ou périodique	Libération progressive de la garantie	Fonds public dédié
Australie	Cautionnement de réhabilitation	100-150% des coûts estimés	Annuelle obligatoire	PRCP obligatoire, pénalités en cas de non-respect	Responsabilité de l'État
USA	Taxe sur la production + fonds de solidarité	Variable selon le fonds	Législativement fixée	Crédits d'impôt pour réhabilitation	Abandoned Mine Land Fund
Afrique du Sud	Garantie bancaire ou assurance	100% des coûts estimés	Annuelle obligatoire	Réduction de garantie liée aux progrès	Programme de réhabilitation publique
Tanzanie	Garantie financière + fonds de fermeture	100% des coûts estimés	Annuelle obligatoire	Report annuel au Chief Inspector	Fonds de solidarité en développement
Algérie	Provision fiscale (Loi 25-12)	Non précisé explicitement	Tous les 5 ans (plan)	Provision déductible fiscalement	Non précisé

5.5 Indicateurs de performance et critères d'achèvement

Les critères d'achèvement peuvent être définis comme des objectifs de performance de réhabilitation ; ils devraient idéalement être rédigés pendant la phase de planification minière en consultation avec les parties prenantes et en accord avec ces dernières. Ces critères devraient être revus régulièrement pour tenir compte de l'évolution des connaissances scientifiques et des attentes sociétales. [6]

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

Tableau 5.3 : Exemples d'indicateurs de performance et critères d'achèvement

Dimension	Indicateur	Méthode de mesure	Critère d'achèvement type	Fréquence de suivi
Physique	Stabilité des talus	Inspection visuelle, levé topographique	Absence d'érosion active, pentes < angle de talus naturel	Annuelle
Physique	Obturation des accès	Inspection, photographies	100% des puits et galeries scellés conformément au plan	À la fin des travaux
Chimique	pH des eaux de drainage	Analyse en laboratoire	pH 6,5-8,5 conformément aux normes	Trimestrielle (année 1-3), semestrielle (année 4-5), annuelle (après)
Chimique	Métaux lourds dans les eaux	Analyse ICP-MS	Conformité aux normes de qualité des eaux	Trimestrielle
Biologique	Couverture végétale	Photographie aérienne, quadrats	> 80% de couverture à 5 ans post-réhabilitation	Annuelle
Biologique	Diversité spécifique végétale	Inventaire floristique	> 15 espèces indigènes par hectare à 10 ans	Annuelle
Biologique	Présence de faune	Pièges photographiques, observations	Présence d'espèces indicatrices à 5 ans	Semestrielle
Socio-économique	Emplois post-mine	Enquêtes auprès des ménages	Maintien de 50% des emplois directs dans les nouvelles activités	Annuelle

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

Dimension	Indicateur	Méthode de mesure	Critère d'achèvement type	Fréquence de suivi
Physique	Stabilité des talus	Inspection visuelle, levé topographique	Absence d'érosion active, pentes < angle de talus naturel	Annuelle
Physique	Obturation des accès	Inspection, photographies	100% des puits et galeries scellés conformément au plan	À la fin des travaux
Chimique	pH des eaux de drainage	Analyse en laboratoire	pH 6,5-8,5 conformément aux normes	Trimestrielle (année 1-3), semestrielle (année 4-5), annuelle (après)
Chimique	Métaux lourds dans les eaux	Analyse ICP-MS	Conformité aux normes de qualité des eaux	Trimestrielle
Biologique	Couverture végétale	Photographie aérienne, quadrats	> 80% de couverture à 5 ans post-réhabilitation	Annuelle
Biologique	Diversité spécifique végétale	Inventaire floristique	> 15 espèces indigènes par hectare à 10 ans	Annuelle
Biologique	Présence de faune	Pièges photographiques, observations	Présence d'espèces indicatrices à 5 ans	Semestrielle
Socio-économique	Emplois post-mine	Enquêtes auprès des ménages	Maintien de 50% des emplois directs dans les nouvelles activités	Annuelle

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

Socio-économique	Satisfaction communautaire	Enquête par questionnaire	> 70% de satisfaction à 3 ans post-fermeture	À 1, 3 et 5 ans
------------------	----------------------------	---------------------------	--	-----------------

5.6 Transition socio-économique et développement post-mine

La transition socio-économique d'une région minière vers une économie post-mine est l'un des défis les plus complexes et les plus mal préparés de la fermeture des mines. L'expérience internationale montre que les fermetures brutales, sans planification préalable de la reconversion économique, entraînent des crises sociales durables : chômage de masse, exode rural, délinquance, dépression des services publics, et perte de l'identité collective. [14]

Le « juste transition » (transition juste) est un concept développé par l'Organisation internationale du Travail (OIT) et adopté par de nombreuses institutions internationales. Il reconnaît que la transition vers une économie durable ne peut se faire au détriment des travailleurs et des communautés dépendantes des industries en déclin. [14]

Secteur d'activité	Atouts du territoire minier	Compétences transférables	Investissements nécessaires	Délai de mise en œuvre
Agriculture et agroalimentaire	Terres réhabilitées, eaux traitées, infrastructures de transport	Gestion de production, logistique, mécanique	Aménagement des terres, équipements agricoles, formation	2-5 ans
Tourisme et patrimoine	Patrimoine industriel, paysages uniques, infrastructures d'accueil	Accueil, restauration, guide, maintenance	Rénovation, signalétique, promotion, formation	3-7 ans
Artisanat et industrie locale	Matériaux locaux, main-d'œuvre qualifiée, bâtiments disponibles	Transformation, fabrication, vente	Ateliers, outillage, commercialisation	1-3 ans

CHAPITRE V:ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS DE LA FERMETURE

Services environnementaux	Sites à surveiller, eaux à traiter, écosystèmes à restaurer	Suivi, maintenance, analyse, gestion	Laboratoires, équipements, certification	Immédiat
Énergies renouvelables	Vastes surfaces, ensoleillement, vent	Électricité, génie civil, maintenance	Panneaux solaires, éoliennes, raccordement	3-5 ans
Économie numérique	Connectivité, bâtiments, jeunesse de la population	Informatique, télécommunications, marketing	Fibre optique, centres de données, formation	2-4 ans

5.7 Cadre institutionnel et gouvernance de la fermeture en Algérie

La mise en œuvre effective de la Loi n° 25-12 du 3 août 2025 en matière de fermeture et de réhabilitation des mines nécessite un cadre institutionnel clair, des compétences techniques disponibles, et une coordination interministérielle efficace. L'Algérie dispose d'atouts institutionnels significatifs mais doit encore renforcer certaines dimensions pour assurer une gestion optimale de la fermeture des mines. [1]

Le ministère de l'Énergie et des Mines, et plus particulièrement l'Agence Nationale du Patrimoine Minier (ANPM), constitue l'autorité de régulation principale. Le ministère de la Transition Énergétique et de l'Environnement joue un rôle croissant dans la réglementation environnementale. Les universités et centres de recherche algériens ont un rôle essentiel à jouer dans la formation des compétences et la recherche appliquée.[1]

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre final propose une synthèse des enseignements tirés de l'ensemble de l'étude et formule des recommandations concrètes destinées aux différents acteurs impliqués dans la planification et la mise en œuvre de la fermeture des mines. Ces recommandations visent à renforcer l'efficacité, la durabilité et l'équité des processus de fermeture, de restauration et de réhabilitation des sites miniers en Algérie et ailleurs.

6.1 Synthèse globale sur la fermeture d'une mine

La fermeture d'une mine est un processus long et complexe qui exige la concertation entre les parties prenantes, des ressources humaines, techniques et financières, et une législation appropriée appliquée et suivie sur le terrain. Ce mémoire a démontré que la fermeture ne saurait être réduite à une simple cessation d'activités, mais constitue une phase à part entière du cycle de vie minier, déterminante pour l'héritage laissé aux générations futures.

Les enseignements fondamentaux tirés de cette étude peuvent être synthétisés en cinq points essentiels. Premièrement, la planification précoce est la condition sine qua non d'une fermeture réussie. Deuxièmement, la réhabilitation progressive constitue une approche gagnante sur tous les plans : environnemental, social, technique et financier. Troisièmement, le cadre législatif et réglementaire est un levier puissant pour améliorer les pratiques de fermeture. Quatrièmement, la participation active des communautés locales est indispensable pour assurer une transition juste et durable. Cinquièmement, le financement adéquat et la garantie financière sont des préalables non négociables.[16]

Tableau 6.1 : Synthèse des facteurs critiques de succès de la fermeture

Facteur critique	Importance	Indicateur de succès	Source de risque
Planification précoce	Détermine 70% des chances de succès	Plan de fermeture approuvé avant le début de l'exploitation	Fermeture soudaine, absence de plan

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Réhabilitation progressive	Réduit les coûts de 20-30%	> 50% de la surface perturbée réhabilitée avant la fin de l'exploitation	Report de tous les travaux à la fin
Financements sécurisés	Garantit l'exécution des travaux	Provision et garantie financière couvrant 100% des coûts estimés	Insuffisance de fonds, faillite de l'opérateur
Participation des communautés	Assure l'acceptabilité sociale	> 80% de satisfaction des parties prenantes	Conflits sociaux, opposition locale
Suivi post-fermeture	Confirme la durabilité	Certification de rétrocession obtenue dans les délais	Problèmes latents (DMA, affaissements)
Compétences techniques	Garantit la qualité des travaux	Taux de réussite des critères d'achèvement > 90%	Inadéquation des techniques, manque d'expertise

6.2 Recommandations

Sur la base de l'analyse conduite tout au long de ce mémoire, des recommandations spécifiques sont formulées pour chaque catégorie d'acteurs impliqués dans la fermeture des mines.[6]

6.2.1 Recommandations pour les opérateurs miniers

1. Intégrer la planification de fermeture dès la phase de faisabilité du projet, avec une mise à jour annuelle du plan détaillé et une révision complète tous les cinq ans conformément à la Loi n° 25-12 ;[1]
2. Mettre en œuvre la réhabilitation progressive dès le démarrage de l'exploitation, en fixant des objectifs annuels de surface réhabilitée et en reportant ces réalisations dans les rapports environnementaux ;

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

3. Caractériser les matériaux des déchets miniers dès la phase d'exploration, en particulier leur potentiel de génération d'acide, pour dimensionner adéquatement les mesures de confinement et de traitement ;
4. Établir des critères d'achèvement de la réhabilitation en consultation avec les parties prenantes et en accord avec les autorités de régulation, avec des indicateurs mesurables et vérifiables ;
5. Allouer des ressources financières adéquates et réviser régulièrement les estimations de coûts de fermeture, en incluant une marge de contingence de 10% minimum et en provisionnant les fonds nécessaires ;
6. Développer les compétences du personnel en matière de réhabilitation écologique, par la formation interne et le recours à des experts externes lorsque nécessaire ;
7. Communiquer de manière transparente et régulière avec les communautés locales sur les plans, les progrès et les écarts de la réhabilitation, en créant des mécanismes de feedback et de plainte.[6]

6.2.2 Recommandations pour les autorités réglementaires algériennes

1. Développer des directives détaillées pour l'élaboration du plan de réhabilitation (article 141 de la Loi 25-12), incluant des modèles, des listes de contrôle et des critères techniques précis pour chaque type de mine ; [17]
2. Établir un cadre de performance pour la fermeture de mine, avec des indicateurs normalisés de succès et des procédures harmonisées d'évaluation et de certification ;
3. Renforcer la surveillance du post-fermeture en fixant une durée minimale de cinq ans, avec des fréquences d'inspection adaptées au niveau de risque du site ;
4. Développer des mécanismes de réduction des garanties financières liés à la réhabilitation progressive réussie, pour inciter les opérateurs à avancer les travaux de remise en état ;
5. Créer un registre national des sites miniers fermés et en voie de fermeture, avec des informations publiques sur l'état de la réhabilitation, les responsables et les échéances ;
6. Renforcer les capacités institutionnelles des services de contrôle par la formation spécialisée, l'équipement technique et le recrutement de compétences en écologie de la restauration et en géotechnique ;

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

7. Promouvoir la recherche et l'innovation en matière de réhabilitation minière par le financement de projets de recherche appliquée et le partenariat avec les universités. [17]

6.2.3 Recommandations pour les communautés locales

1. S'engager activement dans la planification de fermeture dès les premières phases du projet minier, en participant aux consultations publiques et en formulant des attentes claires sur l'utilisation post-mine des terres ;
2. Développer des compétences pour la transition économique post-mine, en diversifiant les activités économiques et en réduisant la dépendance à l'égard de l'exploitation minière ;
3. Participer au suivi et à la surveillance des sites réhabilités, en constituant des comités de veille citoyenne et en signalant les anomalies aux autorités compétentes ;
4. Négocier avec les entreprises minières et les autorités des accords de développement local qui prévoient des contributions financières durables au-delà de la fermeture de la mine ;
5. Préserver et valoriser le patrimoine minier (bâtiments historiques, équipements, archives) comme ressource culturelle et touristique pour la région. [18]

6.2.4 Recommandations pour la recherche universitaire

1. Développer des programmes de recherche sur les techniques de réhabilitation adaptées au contexte algérien, en particulier pour les conditions arides et semi-arides qui caractérisent la majorité du territoire ;
2. Former des spécialistes en écologie de la restauration minière, en créant des cursus dédiés au sein des instituts des mines et des facultés des sciences ;
3. Créer des partenariats entre universités et opérateurs miniers pour le suivi scientifique des sites réhabilités, la mise au point de techniques innovantes et l'évaluation des performances à long terme ;
4. Établir des bases de données nationales sur les sites miniers, incluant les caractéristiques géologiques, les impacts environnementaux, les techniques de réhabilitation employées et les résultats obtenus ;
5. Contribuer à l'élaboration des normes et standards nationaux de réhabilitation minière par l'expertise scientifique et les retours d'expérience documentés. [2]

6.3 Perspectives de recherche et développement

Ce mémoire a posé les bases d'une réflexion approfondie sur la planification de la fermeture, de la restauration et de la réhabilitation des mines en Algérie. Toutefois, de nombreuses questions méritent d'être explorées plus avant par la recherche universitaire et les études sectorielles.

La première perspective concerne le développement de techniques de réhabilitation adaptées aux conditions arides et semi-arides de l'Algérie. La majorité du territoire algérien reçoit moins de 300 mm de précipitations par an, avec des températures estivales fréquemment supérieures à 40°C. [19]

La deuxième perspective porte sur l'évaluation de l'efficacité des mécanismes de financement instaurés par la nouvelle Loi 25-12. La provision fiscale pour réhabilitation est une innovation législative majeure, mais son fonctionnement effectif reste à démontrer.

La troisième perspective concerne la mise en place d'un système national de suivi des sites miniers fermés ou en voie de fermeture, sous forme d'un registre national informatisé et géoréférencé. [19]

La quatrième perspective vise la comparaison systématique des pratiques algériennes avec celles d'autres pays du Maghreb et de l'Afrique subsaharienne.

La cinquième perspective concerne le développement de la formation universitaire et professionnelle en écologie de la restauration minière.

La sixième perspective porte sur l'exploration des opportunités de reconversion des sites miniers vers des usages créatifs et durables.

La septième perspective concerne l'intégration du changement climatique dans la planification de la fermeture des mines. [19]

6.4 Conclusion du chapitre et bilan de la recherche

Ce mémoire a entrepris une analyse approfondie de l'élaboration et de la conception en prévision pour la planification de la fermeture, de la restauration et de la réhabilitation des mines. Les résultats de cette recherche confirment les trois hypothèses initiales. Premièrement, la planification précoce de la fermeture, intégrée dès la phase de faisabilité, réduit

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

effectivement les coûts globaux et améliore la qualité de la réhabilitation. Deuxièmement, la réhabilitation progressive s'avère plus efficace que la remise en état différée sur les plans technique, financier et social. Troisièmement, la participation active des communautés locales est un facteur déterminant de la durabilité socio-économique du post-mine.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La fermeture d'une mine représente bien plus qu'une simple cessation d'activités extractives. C'est un processus complexe, multidimensionnel et de longue durée qui détermine l'héritage laissé aux générations futures et conditionne la pérennité de l'acceptabilité sociale de l'industrie minière. Ce mémoire a démontré que l'approche intégrée, recommandée par l'ICMM et désormais ancrée dans la législation algérienne via la Loi n° 25-12 du 3 août 2025, constitue le cadre optimal pour assurer une transition durable de l'exploitation minière vers un usage post-mine bénéfique.

Les enseignements tirés des analyses théoriques et des études de cas internationales démontrent que la réussite de la fermeture repose sur trois piliers indissociables. Le premier pilier est une planification précoce et continue tout au long du cycle de vie de la mine. L'intégration des considérations de fermeture dès la phase de faisabilité permet d'anticiper les risques, d'optimiser les choix de conception, de réduire les coûts globaux et de préparer les communautés à la transition.

Le deuxième pilier est la réhabilitation progressive, qui réduit les coûts, les risques et démontre concrètement l'engagement de l'opérateur envers la responsabilité environnementale. Les avantages de cette approche sont multiples et documentés : réduction de l'empreinte écologique, renforcement du permis social d'exploitation, affinement des techniques et des estimations de coûts, réduction du passif financier, et avantages fiscaux potentiels.

Le troisième pilier est la participation active des parties prenantes, notamment des communautés locales, pour garantir des bénéfices durables et une transition socio-économique juste. Les fermetures imposées sans consultation préalable ont systématiquement engendré des conflits sociaux, des abandons de sites et des impacts environnementaux négatifs persistants.

La nouvelle Loi minière algérienne n° 25-12 du 3 août 2025, avec ses dispositions sur le plan de réhabilitation quinquennal (article 141), les obligations de remise en état (article 142) et la provision fiscale pour réhabilitation, offre un cadre juridique favorable qui s'inscrit dans la lignée des évolutions internationales. Toutefois, sa mise en œuvre effective nécessitera le développement de directives techniques détaillées, le renforcement des capacités institutionnelles des services de contrôle, et une culture de responsabilité environnementale partagée par tous les acteurs du secteur minier.

Les perspectives de recherche ouvertes par ce travail sont nombreuses. Il serait particulièrement pertinent de développer des études de cas algériennes documentées, de mettre au point des techniques de réhabilitation adaptées aux conditions arides et semi-arides du pays, d'évaluer l'efficacité des mécanismes de financement instaurés par la nouvelle loi, et de comparer les pratiques algériennes avec celles d'autres pays du Maghreb et de l'Afrique subsaharienne.

En définitive, la fermeture des mines doit être considérée non comme une fin, mais comme un nouveau début. Un début qui offre l'opportunité de réparer les impacts de l'exploitation, de créer de nouvelles valeurs écologiques et socio-économiques, et de démontrer que l'industrie minière peut contribuer positivement au développement durable. Comme l'a si bien exprimé le Programme des bonnes pratiques pour le développement durable de l'industrie minière : « L'avenir de l'industrie minière dépend de ce qu'elle laisse à la postérité. » Il appartient à tous les acteurs — opérateurs, régulateurs, chercheurs et communautés — de faire en sorte que cet héritage soit digne des sacrifices consentis et des ressources investies.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Sources législatives et réglementaires :

1-Loi n° 25-12 du 3 août 2025 régissant les activités minières en Algérie. Journal Officiel de la République Algérienne, n° 5213, 7 août 2025.

2-Tanzania Ministry of Minerals. Mine Closure Guidelines, February 2026. Government Printer, Dodoma, Tanzania.

3-Ontario Ministry of Northern Development and Mines. Mining Act, R.S.O. 1990, c. M.14. Code de réhabilitation des sites miniers, R.R.O. 1990, Reg. 240.

4-Gouvernement du Canada. Lignes directrices sur la fermeture des mines, 2006. Ressources naturelles Canada, Ottawa.

5-Australian Government. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry — Mine Closure and Completion. Department of Industry, Tourism and Resources, Canberra, août 2016.

Sources institutionnelles internationales

6-ICMM (International Council on Mining and Metals). Integrated Mine Closure: Good Practice Guide, 3rd edition, February 2025. London, UK.

7-ICMM. Handbook to Support Socio-Economic Transitions in Mining, May 2025. London, UK.

8-APEC (Asia-Pacific Economic Cooperation). Liste de vérification pour la fermeture des mines à l'intention des gouvernements. Groupe de travail sur l'industrie minière, février 2018. Singapore.

9-PNUE, PNUD, OSCE, OTAN. Principales causes de fermeture d'une mine, 2005. United Nations Environment Programme, Nairobi.

10-World Bank Group. Mine Closure Checklist for Governments, 2018. Energy and Extractives Global Practice, Washington DC.

Sources académiques et techniques

- 11-Bradshaw, A.D. (1997). Restoration of mined lands — using natural processes. *Ecological Engineering*, 8(4), pp. 255-269.
- 12-SER (Society for Ecological Restoration). The SER International Primer on Ecological Restoration, 2004. SER, Tucson, Arizona.
- 13-Swapan Kumar Haldar (2018). *Mineral Exploration: Principles and Applications*, 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, 378 pp.
- 14-Stevens, K. (2010). *Mine Rehabilitation: Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry*. Department of Mines and Petroleum, Western Australia.
- 15-Forbes, B.C. et Jeffries, R.L. (1999). Revegetation of Disturbed Arctic Sites: Constraints and Applications. *Biological Conservation*, 88, pp. 15-24.
- 16-Le Guide du MDDEP / MERN (Québec) : *Lignes directrices pour la préparation des plans de fermeture de mine*. C'est l'un des cadres francophones les plus complets concernant la planification précoce et les garanties financières.
- 17-La Banque Mondiale / SFI (Société Financière Internationale). Leurs manuels sur le « *Développement local et engagement des parties prenantes* » décrivent comment impliquer activement les populations pour réussir la transition socio-économique après la mine.
- 18-IGF (Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development). Leur guide « *Gestion de la fermeture des mines : Cadre stratégique pour les gouvernements* » explique précisément le rôle de l'État dans l'application des lois et le suivi du terrain.
- 19-Les publications de l'Université de Ouargla (UKMO) ou de l'Université de Béchar sur la revégétalisation en milieu aride et l'utilisation de la flore locale (comme les plantes halophytes ou xérophiles) pour stabiliser les sols miniers
- 20-KHELFAOUI, Malika (2021). Thèse de Doctorat en Sciences, Option : Environnement / Hydrogéologie, Université de [**Université 20 août 1955 de Skikda**], Algérie
- 21- HADJI, R., et al. Évaluation de la vulnérabilité des zones urbaines face aux risques d'effondrements karstiques et miniers dans la Wilaya de Tébessa. *Revue des Sciences de la Terre*, Université Larbi Tébessi.

22-Laboratoire d'Architecture et d'Urbanisme, Université Tahri Mohammed de Béchar. Valorisation et réhabilitation du patrimoine industriel minier des Houillères du Sud Oranais : Cas de Kénadsa.

23-Étude de faisabilité technico-économique et optimisation des méthodes d'exploitation du gisement de Zinc-Plomb de Chaabet El-Hamra (Aïn Azel, Sétif). Rapport d'ingénierie préparé pour l'ENOF / Ministère de l'Énergie et des Mines, Algérie.

24-Rapports techniques de la société **SOMIPHOS** (Société des Mines de Phosphates d'Algérie), Direction Générale de Bir El-Ater (Tébessa).

25-GUELLAI, Rachid (2019). Modélisation numérique de la stabilité géotechnique des ouvertures souterraines sous l'effet des surcharges : Cas de la mine de fer de Boukhadra (Tébessa). Thèse de Doctorat en Sciences, Option : Génie Minier et Géotechnique, Département des Mines, Université Larbi Tébessi – Tébessa, Algérie.

26-BENBOULAKHRAS, Mohammed Islam (2020). Prise en compte des discontinuités dans l'évaluation de la stabilité des gradins d'une carrière à ciel ouvert : cas de la mine de fer de l'Est de l'Ouenza (Quartier Chagoura Sud). Mémoire de Master Académique, Filière : Génie Minier, Option : Géotechnique, Département des Mines et de Géotechnologie, Institut des Mines, Université Larbi Tébessi – Tébessa, Algérie.

27-PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) (2020). *La gouvernance des ressources minérales au XXIe siècle : Orienter l'industrie extractive vers le développement durable*. Rapport du Panel International des Ressources (IRP), Nairobi.

ANNEXES

Annexe A : Glossaire de la terminologie de la fermeture des mines

Care & Maintenance : Maintenance et entretien des équipements et infrastructures pendant une fermeture temporaire de la mine.

Conception de la fermeture : Intégration des activités de fermeture dans le plan d'exploitation de la mine dès les premières phases de développement.

Déclassement : Processus de mise hors service définitive des installations minières et de préparation du site à la rétrocession.

Drainage Minier Acide (DMA) : Écoulement d'eau acide généré par l'oxydation des minéraux sulfurés exposés par l'exploitation minière.

Durée de vie de la mine (LoM) : Période totale d'existence d'une mine, de l'exploration à la post-fermeture.

Fermeture intégrée : Approche de la fermeture qui prend en compte les dimensions environnementales, sociales et économiques de manière holistique.

Fermeture progressive : Efforts continus déployés tout au long de l'exploitation pour avancer les activités de fermeture et de réhabilitation.

Fermeture soudaine : Arrêt imprévu et immédiat de l'exploitation minière avant la date prévue.

Garantie financière : Sûreté exigée par l'autorité de régulation pour garantir l'exécution des travaux de réhabilitation.

Mine orpheline : Site minier abandonné dont le propriétaire responsable ne peut être identifié ou n'est pas en mesure d'assumer les coûts de réhabilitation.

Permis social d'opérer : Acceptation implicite ou explicite par la société des activités d'une entreprise, fondée sur la confiance et la légitimité.

Plan de fermeture : Document technique détaillant les activités, les objectifs, les critères et les coûts de la fermeture d'une mine.

Provision pour réhabilitation : Réserve financière constituée par l'opérateur pour couvrir les futurs coûts de remise en état du site.

Réhabilitation : Établissement d'un écosystème stable et productif, sans nécessairement restaurer l'écosystème originel.

Restauration : Rétablissement de la structure et de la fonction d'un écosystème à l'image de son état antérieur proche de l'état naturel.

Rétrocession : Transfert formel de la responsabilité du site réhabilité de l'opérateur minier aux nouveaux usagers des terres ou à l'État.

Revégétalisation : Introduction et établissement d'une nouvelle végétation à la suite d'une perturbation du sol.

Stériles : Matériaux non rentables extraits avec le minerai et stockés en haldes ou versés dans les vides miniers.

Suivi post-fermeture : Surveillance continue du site après la fin des travaux de fermeture pour vérifier la durabilité de la réhabilitation.

Tailings / Résidus miniers : Matériaux fins résultant du traitement du minerai, généralement stockés sous forme de pulpe dans des parcs à résidus.

Annexe B : Liste de vérification pour l'élaboration d'un plan de fermeture

A. ASPECTS ADMINISTRATIFS ET INSTITUTIONNELS

- ☐ Constitution d'une commission technique de fermeture (nationale, régionale, locale ou ad hoc)
- ☐ Identification et mobilisation des parties prenantes
- ☐ Consultation publique et recueil des attentes
- ☐ Accord sur les objectifs et critères d'achèvement
- ☐ Désignation des responsabilités et des échéances

B. ASPECTS TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

- ☐ Caractérisation des matériaux (sols, stériles, résidus)
- ☐ Évaluation des risques géotechniques et hydrologiques
- ☐ Plan de démantèlement des infrastructures
- ☐ Plan de gestion des eaux de surface et souterraines
- ☐ Plan de remblayage et de reprofilage des reliefs
- ☐ Plan de revégétalisation et de restauration écologique
- ☐ Plan de gestion des déchets dangereux
- ☐ Plan de surveillance post-fermeture

C. ASPECTS FINANCIERS

- ☐ Estimation détaillée des coûts de fermeture
- ☐ Marge de contingence (minimum 10%)
- ☐ Constitution de la provision pour réhabilitation
- ☐ Établissement de la garantie financière
- ☐ Plan de financement et calendrier de décaissement
- ☐ Mécanismes de révision des coût

D. ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES

- ☐ Analyse des impacts socio-économiques de la fermeture
- ☐ Plan de reconversion des travailleurs
- ☐ Plan de développement économique post-mine
- ☐ Préservation et réutilisation des infrastructures
- ☐ Programme de communication et de transparence

E. ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

- ☐ Conformité aux exigences de la Loi minière n° 25-12
- ☐ Obtention des autorisations de fermeture
- ☐ Respect des normes environnementales en vigueur
- ☐ Préparation de la certification de rétrocession
- ☐ Archivage des documents et des données de suivi

Annexe C : Tableau comparatif des législations minières

Tableau C.1 : Comparaison des cadres législatifs de fermeture des mines

Pays	Texte de référence	Plan de fermeture	Garantie financière	Suivi post-fermeture	Provision fiscale
Algérie	Loi n° 25-12 du 3 août 2025	Obligatoire, révision tous les 5 ans (Art. 141)	Non explicitement précisée	Obligation de remise en état (Art. 142)	Oui, provision déductible du bénéfice imposable
Canada (Ontario)	Mining Act, R.S.O. 1990, c. M.14	Obligatoire avant travaux d'exploration avancée	Obligatoire, équivalent aux coûts de réhabilitation	Selon les conditions du permis	Non spécifique
Australie	Leading Practice Sustainable Development Program	Obligatoire, plan détaillé 2 ans avant fermeture	Obligatoire, révisable	Minimum 5-20 ans selon les risques	Non spécifique
Tanzanie	Mine Closure Guidelines, 2026	Obligatoire dès la demande de permis	Obligatoire, révision annuelle obligatoire	Report annuel au Chief Inspector	Non spécifique

Roumanie	Loi sur les mines n° 85/2003	Obligatoire, approuvé par l'autorité compétente	Obligatoire	Selon le plan approuvé	Non spécifique
Afrique du Sud	Financial Provisioning for Rehabilitation and Closure	Obligatoire	Obligatoire, révision annuelle	Selon les conditions du permis	Non spécifique

Annexe D : Chronogramme type pour la fermeture d'une mine souterraine

Tableau D.1 : Phases et durées du processus de fermeture d'une mine souterraine

Phase	Activités principales	Durée estimée	Acteurs responsables
Préparation	Mise à pied du personnel, examen du plan, consultation des parties prenantes	6-12 mois	Entreprise, autorités, syndicats
Démantèlement	Démontage des installations, élimination des produits chimiques, gestion des déchets	1-3 ans	Entreprise, sous-traitants
Remblayage	Remplissage des puits et galeries, consolidation des ouvrages, scellement	1-2 ans	Entreprise, ingénieurs géotechniciens
Remise en état	Reprofilage, stabilisation des sols, revégétalisation	1-3 ans	Entreprise, écologues
Surveillance	Suivi de la qualité de l'eau, inspections géotechniques, monitoring	5-20 ans	Entreprise, autorités, experts
Rétrocession	Certification finale, transfert de responsabilité	6-12 mois	Autorités, nouveaux propriétaires

Annexe E : Cartographie des risques post-fermeture

La cartographie des risques post-fermeture est un outil essentiel pour prioriser les actions de surveillance et d'intervention. Les risques principaux identifiés pour les mines souterraines et à ciel ouvert sont classés selon leur probabilité d'occurrence et leur gravité potentielle.

Tableau E.1 : Matrice des risques post-fermeture

Risque	Probabilité	Gravité	Niveau de risque	Mesures de mitigation
Effondrement souterrain	Moyenne	Élevée	ÉLEVÉ	Scellement des accès, surveillance géotechnique, remblayage
Drainage minier acide	Élevée	Élevée	CRITIQUE	Couverture des stériles, traitement passif, monitoring de l'eau
Contamination des eaux	Élevée	Élevée	CRITIQUE	Systèmes de collecte, traitement, piézomètres
Accès non autorisé	Élevée	Moyenne	ÉLEVÉ	Obturation, clôtures, signalisation, patrouilles
Affaissement de surface	Moyenne	Moyenne	MOYEN	Surveillance topographique, restrictions d'usage
Incendie	Faible	Moyenne	FAIBLE	Élimination des matériaux combustibles, surveillance
Érosion des haldes	Élevée	Moyenne	ÉLEVÉ	Reprofilage, couverture végétale, drainage
Perte de biodiversité	Moyenne	Moyenne	MOYEN	Réhabilitation écologique, corridors, suivi biologique

La gestion de ces risques doit être intégrée dans le plan de fermeture dès la phase de conception de la mine. Une approche préventive, fondée sur l'analyse des risques et la hiérarchisation des actions, permet de réduire significativement les coûts et les impacts potentiels du post-fermeture. La surveillance continue et l'adaptation des mesures de mitigation en fonction des résultats du monitoring sont des éléments clés d'une gestion durable des risques post-minier.