



CIRANO

Allier savoir et décision

OBSTACLES ET INCITATIFS À L'ADOPTION DES TECHNOLOGIES INNOVANTES DANS LE SECTEUR MINIER QUÉBÉCOIS –

Accent sur le processus décisionnel des
investisseurs dans un contexte ESG
grandissant



NATHALIE DE MARCELLIS-WARIN
FRANÇOIS VAILLANCOURT
INGRID PEIGNIER
MOLIVANN PANOT
THOMAS GLEIZE
SIMON LOSIER

RP

2024RP-01
RAPPORT DE PROJET

Les rapports de projet sont destinés plus spécifiquement aux partenaires et à un public informé. Ils ne sont ni écrits à des fins de publication dans des revues scientifiques ni destinés à un public spécialisé, mais constituent un médium d'échange entre le monde de la recherche et le monde de la pratique.

Project Reports are specifically targeted to our partners and an informed readership. They are not destined for publication in academic journals nor aimed at a specialized readership, but are rather conceived as a medium of exchange between the research and practice worlds.

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations-membres, d'une subvention d'infrastructure du gouvernement du Québec, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Quebec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the government of Quebec, and grants and research mandates obtained by its research teams.

Les partenaires du CIRANO – CIRANO Partners

Partenaires corporatifs – Corporate Partners

*Autorité des marchés financiers
Banque de développement du Canada
Banque du Canada
Banque nationale du Canada
Bell Canada
BMO Groupe financier
Caisse de dépôt et placement du Québec
Énergir
Hydro-Québec
Innovation, Sciences et Développement économique Canada
Intact Corporation Financière
Investissements PSP
Manuvie Canada
Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie
Ministère des finances du Québec
Mouvement Desjardins
Power Corporation du Canada
Ville de Montréal*

Partenaires universitaires – Academic Partners

*École de technologie supérieure
École nationale d'administration publique
HEC Montréal
Institut national de la recherche scientifique
Polytechnique Montréal
Université Concordia
Université de Montréal
Université de Sherbrooke
Université du Québec
Université du Québec à Montréal
Université Laval
Université McGill*

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site web. CIRANO collaborates with many centers and university research chairs; list available on its website.

© Janvier 2024. Nathalie de Marcellis-Warin, François Vaillancourt, Ingrid Peignier, Molivann Panot, Thomas Gleize, Simon Losier. Tous droits réservés. *All rights reserved. Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©. Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.*

Les idées et les opinions émises dans cette publication sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas les positions du CIRANO ou de ses partenaires. The observations and viewpoints expressed in this publication are the sole responsibility of the authors; they do not represent the positions of CIRANO or its partners.

ISSN 1499-8629 (version en ligne)

OBSTACLES ET INCITATIFS À L'ADOPTION DES TECHNOLOGIES INNOVANTES DANS LE SECTEUR MINIER QUÉBÉCOIS – Accent sur le processus décisionnel des investisseurs dans un contexte ESG grandissant

Nathalie de Marcellis-Warin^{}, François Vaillancourt[†], Ingrid Peignier[‡], Molivann Panot[§], Thomas Gleize^{**}, Simon Losier^{††}*

Résumé/Abstract

Le présent rapport de recherche vise à identifier et à mieux comprendre les obstacles et les incitatifs à l'adoption de technologies innovantes dans le secteur minier québécois en phase d'exploitation, tout en examinant l'impact potentiel des critères ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance) sur cette adoption. Le constat initial, en se basant sur les plus récentes données publiées par Statistique Canada (période 2017-2019), soulignait un certain retard du secteur minier québécois en matière d'innovation par rapport à d'autres secteurs industriels ainsi qu'un certain retard en termes d'innovations organisationnelles par rapport aux compagnies minières ontariennes. Ce projet vise à mettre à jour ces constats, en particulier à la lumière des changements économiques des cinq dernières années. L'investissement minier au Québec a d'ailleurs connu une augmentation en 2022 par rapport aux cinq années précédentes.

Le premier volet du projet repose sur une revue approfondie de la littérature concernant l'innovation minière et la finance durable, établissant ainsi une base solide de connaissances. Le deuxième volet du projet vise à actualiser les constats émanant de la littérature et à les valider, infirmer ou nuancer en les appliquant spécifiquement au contexte québécois. Cette phase a impliqué des entretiens avec 30 acteurs clés du secteur, complétés par plus de 50 rencontres informelles lors d'événements sectoriels.

L'innovation au sein du secteur minier est considérée comme un levier créateur d'avantages compétitifs, engendrant des économies de coûts, une amélioration de l'efficacité et de la productivité, tout en offrant des avantages plus difficilement quantifiables, tels que la réduction des risques en matière de santé/sécurité, d'environnement, et de réputation. Toutefois,

* Polytechnique Montréal et CIRANO

† Université de Montréal et CIRANO

‡ CIRANO

§ CIRANO

** CIRANO

†† CIRANO

l'adoption des innovations dans le secteur minier est influencée par trois catégories de facteurs :

1. les caractéristiques économiques inhérentes au secteur, notamment l'intensité en capital et l'aspect cyclique de l'industrie minière ;
2. le contexte organisationnel complexe du secteur, axé sur la gestion des risques et marqué par une aversion aux pertes ;
3. l'écosystème spécifique du secteur au Québec, caractérisé par des acteurs aux intérêts parfois divergents, qui rend parfois complexe la gouvernance des données, surtout dans un contexte d'intensification de la transformation numérique de l'industrie.

L'essor des critères ESG dans le secteur minier crée de nouveaux défis. La demande croissante de transparence de la part des investisseurs peut impacter les entreprises, en particulier les sociétés minières, où le maintien de la licence sociale d'exploitation demeure crucial. Au-delà des émissions de gaz à effet de serre, une transparence accrue concernant les impacts sociaux et environnementaux devient essentielle. Bien que le lien entre la performance ESG et financière ne fasse pas l'objet d'un consensus actuellement, des pratiques ESG déficientes sont perçues comme préjudiciables. Le suivi précis des données ESG et une transparence reposant sur des cadres communs seront utiles pour anticiper d'éventuelles réglementations à venir.

En conclusion, il est essentiel d'orienter les investissements vers des technologies durables, de promouvoir la collaboration avec tous les intervenants de l'industrie et de se préparer à une transparence accrue sur les critères ESG, harmonisée à l'échelle industrielle.

Mots-clés/Keywords : Innovation minière, Secteur minier, Finance durable, ESG, Licence sociale d'opérer, Données, Incitatifs et freins à l'adoption d'innovation, Transformation numérique / Mining innovation, Mining sector, Sustainable finance, ESG, Social license to operate, Data, Incentives and barriers to innovation adoption, Digital transformation

Pour citer ce document / To quote this document

de Marcellis-Warin, N., Vaillancourt, F., Peignier, I., Panot, M., Gleize, T., & Losier, S. (2024). Obstacles et incitatifs à l'adoption des technologies innovantes dans le secteur minier québécois – Accent sur le processus décisionnel des investisseurs dans un contexte ESG grandissant (2024RP-01, Rapports de projets, CIRANO.) <https://doi.org/10.54932/DLXT6536>

Table des matières

MISE EN CONTEXTE.....	13
1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE.....	14
1.1 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	16
1.2 PLAN DU RAPPORT	17
2 MISE EN CONTEXTE AVEC DES DONNÉES GÉNÉRALES SUR L'INDUSTRIE MINIÈRE AU QUÉBEC.....	20
2.1 PRÉSENTATION DE L'INDUSTRIE MINIÈRE AU QUÉBEC.....	20
2.2 IMPORTANCE DE L'EXTRACTION MINIÈRE DANS L'ÉCONOMIE QUÉBÉCOISE	24
2.3 LES INVESTISSEMENTS DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE AU QUÉBEC.....	27
2.3.1 Répartition de l'investissement par région.....	27
2.3.2 Répartition de l'investissement par catégories de dépenses.....	28
2.3.3 Répartition des dépenses en travaux d'exploration selon le minéral.....	30
2.4 DONNÉES D'ENQUÊTES SUR L'INNOVATION AUPRÈS D'ENTREPRISES DU SECTEUR MINIER AU QUÉBEC EN COMPARAISON AVEC D'AUTRES PROVINCES CANADIENNES ET D'AUTRES SECTEURS INDUSTRIELS	31
2.5 PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE POINTE ET IMPACTS DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE AU QUÉBEC	34
2.6 ZOOM SUR L'ACCEPTABILITÉ SOCIALE DE L'INDUSTRIE MINIÈRE : DES DONNÉES UNIQUES SUR 10 ANS POUR LE QUÉBEC GRÂCE AU BAROMÈTRE CIRANO	38
2.6.1 Les perceptions des Québécois envers l'exploitation des mines en 2022	38
2.6.2 Des différences de perceptions de l'exploitation des mines selon la région d'habitation et selon les années d'enquête.....	40
2.6.3 Liens du Baromètre CIRANO avec le projet de recherche.....	47
VOLET 1 - REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES OBSTACLES ET LES INCITATIFS À L'ADOPTION DES INNOVATIONS DANS LE SECTEUR MINIER.....	49
3 CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES INHÉRENTES À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS.....	50
3.1 LES GRANDS DÉFIS DE L'INDUSTRIE MINIÈRE.....	50
3.1.1 Des enjeux de productivité.....	50
3.1.2 Des enjeux de main-d'œuvre.....	53
3.1.3 Des enjeux environnementaux.....	53
3.2 CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES INHÉRENTES À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCENT L'INNOVATION	55
3.2.1 Les gîtes miniers sont non renouvelables.....	55
3.2.2 Les ressources minérales sont dispersées géographiquement.....	55
3.2.3 Le cycle minier est intensif en capital.....	56
3.2.4 Les étapes du processus de développement minéral sont souvent réalisées en silo et les choix technologiques sont souvent faits au moment de l'étude de faisabilité	56
3.2.5 Les minières sont dépendantes des prix sur les marchés mondiaux	57
3.2.6 Le cycle d'exploitation minière a des impacts locaux importants sur l'environnement et les communautés.....	58

4	UN CONTEXTE ORGANISATIONNEL DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS	59
4.1	L'INCERTITUDE ET LES RISQUES LIÉS AUX TECHNOLOGIES ÉMERGENTES NON ÉPROUVÉES DISSUADENT LES INVESTISSEMENTS	59
4.2	LES COMPAGNIES MINIÈRES SONT GÉNÉRALEMENT PLUS AVERSES AUX PERTES	60
4.3	LES PROJETS PILOTES SONT IMPORTANTS POUR RÉDUIRE L'INCERTITUDE ASSOCIÉE AUX TECHNOLOGIES INNOVANTES	62
4.4	LA CULTURE D'APPRENTISSAGE ET LE PARTAGE DE SAVOIR INTERDISCIPLINAIRE SONT IMPORTANTS POUR MITIGER L'AVERSION AUX PERTES	62
4.5	LA COMMUNICATION ET LA COLLABORATION AUX DIFFÉRENTS NIVEAUX DE L'ORGANISATION SONT IMPORTANTES POUR FAVORISER UNE CULTURE D'INNOVATION	63
4.6	LES SYSTÈMES DE PERFORMANCE ET DE RECONNAISSANCE SONT AXÉS SUR L'EFFICACITÉ ET L'EFFICIENCE AU DÉTRIMENT DE LA CRÉATIVITÉ ET DE L'APPRENTISSAGE	64
5	UN ÉCOSYSTÈME SPÉCIFIQUE À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS	66
5.1	L'INFLUENCE DES GOUVERNEMENTS DANS L'ADOPTION D'INNOVATIONS	67
5.2	L'INFLUENCE DES ÉQUIPEMENTIERS DANS L'ADOPTION D'INNOVATIONS	69
5.2.1	<i>Un changement de paradigme dans la structure de l'innovation minière durant les dernières décennies : une désintégration verticale des grandes entreprises minières et un nouvel écosystème d'innovation alimenté principalement par les METS</i>	69
5.2.2	<i>De nouveaux rapports de force entre les METS et les minières en lien avec la transformation numérique</i>	70
5.3	L'INFLUENCE DES CONSULTANTS IMPLIQUÉS DANS LES RAPPORTS TECHNIQUES NI 43-101 DANS L'ADOPTION D'INNOVATIONS	73
5.4	UNE COOPÉRATION NÉCESSAIRE ENTRE TOUS LES ACTEURS DE L'ÉCOSYSTÈME MINIER POUR FACILITER L'ADOPTION D'INNOVATIONS	74
5.5	L'INFLUENCE DES INVESTISSEURS DANS L'ADOPTION D'INNOVATIONS À TRAVERS L'ANALYSE D'UNE SIMULATION FINANCIÈRE	76
5.5.1	<i>Méthodologie</i>	76
5.5.2	<i>Hypothèses utilisées pour la simulation</i>	78
5.5.3	<i>Résultats des simulations</i>	79
5.5.4	<i>Interprétation et conclusion</i>	83
6	UN CONTEXTE ESG QUI INFLUENCE LA PRISE DE DÉCISION ET L'ADOPTION D'INNOVATIONS AU SEIN DU SECTEUR MINIER	86
6.1	L'EXISTENCE DE NOMBREUX CADRES DE DIVULGATION ESG À CE JOUR	86
6.1.1	<i>Aux origines des facteurs ESG, la responsabilité sociale des entreprises</i>	86
6.1.2	<i>Au cœur des facteurs ESG, l'analyse de matérialité</i>	87
6.1.3	<i>L'émergence des cadres de divulgation ESG</i>	88
6.2	VERS UNE HARMONISATION DES CADRES	90
6.2.1	<i>Attente des investisseurs</i>	90
6.2.2	<i>Le projet de l'ISSB</i>	90
6.2.3	<i>La place de la biodiversité dans les nouveaux cadres de divulgation</i>	94
6.3	SECTEUR MINIER ET ESG	94
6.3.1	<i>Les objectifs spécifiques des activités minières</i>	94

6.3.2	<i>Les impacts de l'industrie minière.....</i>	97
6.3.3	<i>Le déploiement de la divulgation ESG au sein de l'industrie.....</i>	99
6.4	DIVULGATION ESG ET IMPACT FINANCIER.....	101
6.4.1	<i>Critères ESG et performance financière.....</i>	101
6.4.2	<i>Facteurs ESG et coût du capital.....</i>	103
6.4.3	<i>Favoriser le déploiement de l'ESG dans le secteur minier québécois.....</i>	103
VOLET 2 – CONSULTATION DES ACTEURS DU SECTEUR MINIER SUR LES OBSTACLES ET LES INCITATIFS À L'ADOPTION DES INNOVATIONS DANS LE SECTEUR.....		
110		
7	OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE LA CONSULTATION AUPRÈS DES ACTEURS DU SECTEUR MINIER QUÉBÉCOIS.....	111
7.1	OBJECTIFS DE LA CONSULTATION DES ACTEURS DU SECTEUR MINIER.....	111
7.2	MÉTHODOLOGIE DE LA CONSULTATION DES ACTEURS DU SECTEUR MINIER.....	112
7.3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	114
7.4	SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES ISSUES DE LA REVUE DE LITTÉRATURE À CONFIRMER LORS DES ENTREVUES.....	119
8	FAITS SAILLANTS DES ENTREVUES SUR LES GÉNÉRALITÉS ET LES ENJEUX TECHNOLOGIQUES QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS DANS LE SECTEUR MINIER AU QUÉBEC.....	121
8.1	UN CONSENSUS SUR L'ADOPTION DE L'INNOVATION DANS LE SECTEUR MINIER.....	122
8.1.1	<i>Un secteur minier très conservateur.....</i>	122
8.1.2	<i>Un besoin de rentabilité à la hauteur des investissements.....</i>	123
8.2	QUELQUES DIFFÉRENCES DANS L'ADOPTION DE L'INNOVATION SELON LE TYPE ET LA TAILLE DE LA MINE ET SELON LE MINÉRAI.....	124
8.2.1	<i>Des différences dans l'adoption de l'innovation selon le type de la mine et son âge.....</i>	124
8.2.2	<i>Des différences dans l'adoption de l'innovation selon la taille de la mine.....</i>	125
8.2.3	<i>Des différences dans l'adoption de l'innovation selon le minéral.....</i>	125
8.3	PRINCIPALES TECHNOLOGIES INNOVANTES DANS LES MINES AU QUÉBEC ET AU CANADA.....	126
8.3.1	<i>Par qui et par quoi sont portées les technologies innovantes?.....</i>	127
8.4	UN CONSENSUS SUR LES BÉNÉFICES OPÉRATIONNELS APPORTÉS PAR LES TECHNOLOGIES INNOVANTES.....	128
8.5	DES DÉFIS ET DES ENJEUX TECHNOLOGIQUES À L'ADOPTION D'INNOVATIONS.....	129
8.5.1	<i>Un besoin pour des tests pilotes.....</i>	129
8.5.2	<i>Des enjeux d'interopérabilité.....</i>	130
8.5.3	<i>Des enjeux quant à la propriété des données.....</i>	130
9	FAITS SAILLANTS DES ENTREVUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES INHÉRENTES À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS AU QUÉBEC.....	131
9.1	L'INFLUENCE DU PRIX DES COMMODITÉS SUR L'INNOVATION.....	132
9.2	DES ENJEUX DE DISPONIBILITÉS RAPIDES DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES.....	132
9.3	DES ENJEUX D'ACCÈS ET DE DISPONIBILITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ VERTE.....	133
9.4	DES ENJEUX RELIÉS À L'ÉLOIGNEMENT GÉOGRAPHIQUE.....	134
9.5	DES ENJEUX GÉOLOGIQUES POUVANT EXERCER UNE INFLUENCE SUR L'ADOPTION D'INNOVATION.....	134
10	FAITS SAILLANTS DES ENTREVUES SUR LE CONTEXTE ORGANISATIONNEL DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS AU QUÉBEC.....	136
10.1	DES INCERTITUDES PERÇUES PAR LES MINIÈRES QUANT À LA RENTABILITÉ DE CERTAINES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES.....	136

10.2	UNE AVERSION AUX PERTES MANIFESTE DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE AU QUÉBEC	136
10.3	DES DÉCISIONS PRISES À PLUSIEURS NIVEAUX DE LA CHAÎNE DÉCISIONNELLE.....	137
10.4	UNE INTÉGRATION NÉCESSAIRE DES OPÉRATIONS DANS LA PRISE DE DÉCISION POUR GARANTIR L'ACCEPTATION D'UNE TECHNOLOGIE INNOVANTE	138
10.5	UNE RÉSISTANCE AUX CHANGEMENTS DE LA PART DES ÉQUIPES OPÉRATIONNELLES.....	138
10.6	UNE PLUS GRANDE DIVERSITÉ DE PARCOURS PROFESSIONNELS AU SEIN DES CA INFLUENÇANT L'ADOPTION DE L'INNOVATION	139
10.7	UNE STRUCTURE ORGANISATIONNELLE AVEC PEU D'EXTERNALISATION	140
10.8	DES DÉFIS ET DES ENJEUX EN LIEN AVEC LES RESSOURCES HUMAINES DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS	140
10.8.1	<i>Enjeux liés à une main-d'œuvre vieillissante : difficulté liée au transfert de connaissances et résistance aux changements</i>	140
10.8.2	<i>Enjeux de rétention de la main-d'œuvre</i>	141
10.8.3	<i>Besoins de formation aux nouvelles technologies pour augmenter leur acceptabilité ..</i>	141
10.8.4	<i>Enjeux d'attraction de main-d'œuvre</i>	142
10.8.5	<i>De nouvelles compétences recherchées, mais en concurrence avec d'autres secteurs industriels et d'autres pays.....</i>	142
10.8.6	<i>Un besoin de connaissances et de compétences à l'interne comme prérequis à l'adoption d'innovations.....</i>	143
11	FAITS SAILLANTS DES ENTREUVES SUR L'ÉCOSYSTÈME DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS AU QUÉBEC.....	144
11.1	QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉCOSYSTÈME DE L'INDUSTRIE MINIÈRE	144
11.1.1	<i>Des enjeux reliés à l'éloignement d'un écosystème d'innovation</i>	144
11.1.2	<i>Des enjeux écosystémiques</i>	144
11.2	INFLUENCE DES GOUVERNEMENTS SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS	145
11.2.1	<i>Des programmes gouvernementaux pour stimuler l'innovation.....</i>	145
11.2.2	<i>Une nécessité d'aligner les cadres réglementaires avec les avancées technologiques ..</i>	145
11.2.3	<i>Une harmonisation des réglementations pour stimuler l'innovation</i>	146
11.2.4	<i>Une protection des idées par des brevets pour stimuler l'innovation</i>	146
11.3	INFLUENCE DES ÉQUIPEMENTIERS SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS	147
11.3.1	<i>Le rôle des équipementiers dans l'adoption d'innovations.....</i>	147
11.4	INFLUENCE DES CONSULTANTS IMPLIQUÉS DANS LES RAPPORTS TECHNIQUES NI 43-101 SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS	148
11.5	INFLUENCE DES INVESTISSEURS SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS.....	149
11.5.1	<i>Le rôle des investisseurs et des consultants dans l'adoption d'innovations.....</i>	149
11.5.2	<i>Les critères pris en compte par les investisseurs</i>	149
11.6	UN BESOIN DE COLLABORATION SUR TOUTE LA CHAÎNE ET AVEC TOUS LES ACTEURS DU SECTEUR MINIER.....	151
12	FAITS SAILLANTS DES ENTREUVES SUR LE CONTEXTE ESG QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS DANS LE SECTEUR MINIER AU QUÉBEC	153
12.1	CONSCIENCE DES ENJEUX ESG PAR L'INDUSTRIE MINIÈRE	153
12.2	DÉFIS DE L'INTÉGRATION DE L'ESG.....	155
12.3	ENJEUX OPÉRATIONNELS POUR LA CONFORMITÉ AUX ESG	156
12.4	GUIDES DE BONNES PRATIQUES ET RÉGLEMENTATION	158
12.5	INNOVATION ET ATTEINTE DES OBJECTIFS ESG.....	160

12.6	INFLUENCE DE L'ÉCOSYSTÈME POUR UNE TRANSFORMATION DE L'INDUSTRIE VERS LES ESG	161
13	CONCLUSION ET DISCUSSION.....	165
14	ANNEXES	172
14.1	ANNEXE 1 : PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE POINTE DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE : DESCRIPTION ET ÉVALUATION DES COÛTS ET DES BÉNÉFICES	172
14.1.1	<i>Bref tour d'horizon des technologies émergentes dans le secteur minier.....</i>	173
14.1.2	<i>Disponibilité et accès aux données.....</i>	175
14.1.3	<i>La transformation numérique dans l'industrie minière.....</i>	176
14.1.4	<i>L'automatisation dans l'industrie minière</i>	180
14.1.5	<i>L'électrification dans l'industrie minière.....</i>	184
14.1.6	<i>Analyse d'autres technologies dans l'industrie minière</i>	186
14.1.7	<i>Bilan de l'annexe sur les évaluations des coûts et des bénéfices de certaines innovations technologiques.....</i>	189
14.2	ANNEXE 2 : LISTE DES RAPPORTS NI 43-101 ET TABLEAU SYNTHÈSE	193
14.3	ANNEXE 3 : HYPOTHÈSES DÉTAILLÉES DE LA SIMULATION FINANCIÈRE	201
14.3.1	<i>Automatisation des LHDs et des camions</i>	201
14.3.2	<i>Électrification des LHDs et des camions</i>	202
14.3.3	<i>Données financières du projet « Val-d'Or East</i>	203
14.3.4	<i>Flux financiers du projet initial</i>	206
14.4	RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES SIMULATIONS FINANCIÈRES	207
14.4.1	<i>Comparaison des scénarios.....</i>	207
14.5	ANNEXE 4 : GUIDE D'ENTREVUES	213
15	BIBLIOGRAPHIE.....	218

Table des figures

Figure 1 : Plan du rapport de recherche	18
Figure 2 : Étapes du cycle de vie minier.....	21
Figure 3 : Carte des mines actives et en maintenance au Québec, 2023	22
Figure 4 : Carte des projets miniers au Québec,2023.....	23
Figure 5 : Évolution du PIB de l'industrie de l'extraction de minerais.....	25
Figure 6 : Part de chaque sous-secteur dans le PIB de l'industrie de l'extraction de minerais métalliques et non métalliques (sauf pierre) au Québec (en %)	26
Figure 7 : Répartition de l'investissement minier par régions administratives et évolution par rapport à 2021, Québec, 2022 (M\$).....	28
Figure 8 : Répartition des dépenses d'investissement minier et variation par rapport à 2021, Québec, 2022 (M\$).....	29
Figure 9 : Répartition des dépenses d'investissement selon le type de dépenses au Québec depuis 2018	30
Figure 10 : Répartition des dépenses en travaux d'exploration et de mise en valeur selon le minerai, Québec, 2022.....	31
Figure 11 : Comparaisons de données sur les innovations issues de l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprises de Statistique Canada (Période 2017-2019) .	32
Figure 12 : Entreprises minières québécoises (SCIAN 212) constatant des économies de coûts engendrés par des innovations de procédés	33
Figure 13 : Pourcentage de réduction de coûts observés à la suite d'une innovation de procédés au Québec (2017-2019)	33
Figure 14 : Innovations de produits ou de procédés avec des avantages environnementaux pour les secteurs miniers et manufacturier en 2015-2017 et 2017-2019 au Québec	34
Figure 15 : Évaluation des niveaux de risque et de bénéfices à propos de l'exploitation des mines au Québec entre 2013 et 2022	39
Figure 16 : Perception du niveau d'acceptabilité sociale pour 21 enjeux à l'étude dans le Baromètre CIRANO 2022	40
Figure 17 : Répartition des niveaux d'acceptabilité sociale selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO.....	41
Figure 18 : Répartition des niveaux de bénéfices perçus selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO	42
Figure 19 : Répartition des niveaux de risque selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO	43
Figure 20 : Répartition des niveaux de confiance selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO	44

Figure 21 : Affichages croisés des données sociodémographiques du Baromètre CIRANO au sujet de l'exploitation des mines	46
Figure 22 : Parties prenantes d'un gisement minier	66
Figure 23 : Cartographie des contributeurs à l'établissement des normes de l'ISSB	92
Figure 24 : Évolution des émissions de GES au Québec pour le secteur de l'extraction de minerais métalliques (2009-2020)	98
Figure 25 : Cartes présentant la superposition des zones intactes et les projets miniers	99
Figure 26 : Liens et interdépendance technologique de l'industrie 4.0	174
Figure 27 : Technologies de transformation numérique aux différents stades de la chaîne de valeur minière.....	177

Table des tableaux

Tableau 1 : Quelques statistiques des industries de l'extraction minière pour les minerais métalliques (2122) et certains minerais non métalliques (21 239), Québec	27
Tableau 2 : Prévission des écarts d'embauche dans l'industrie minière canadienne par sous-secteur (2020-2030)	53
Tableau 3 : Hypothèses quant aux impacts de l'implantation des technologies de pointe sur les différents postes	78
Tableau 4 : Hypothèses quant à la structure de coûts associés aux différents postes affectés par l'implantation des technologies de pointe.....	79
Tableau 5 : Résultats des simulations pour l'automatisation	83
Tableau 6. Liste détaillée des profils de répondants.....	113
Tableau 7. Tableau récapitulatif des entretiens menés dans le cadre de ce projet de mai à septembre 2023	114
Tableau 8 : Comparaison synthétique de la revue des écrits et des entrevues	115

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements à M. Alain Beauséjour, directeur général du groupe MISA, ainsi qu'à son équipe, notamment Hachmi Ben Daly, chargé de projet en innovation minière. Leur soutien et leur expertise ont joué un rôle déterminant dans la réalisation réussie de ce projet, en particulier lors de nos rencontres de travail, et leur contribution a été inestimable dans la mise à disposition de documentation pertinente.

Nous sommes également reconnaissants envers toutes les personnes qui ont généreusement consacré leur temps et partagé leurs connaissances lors des entretiens. Leurs perspectives ont considérablement enrichi notre compréhension du sujet.

Nos remerciements s'étendent également aux relecteurs du comité scientifique pour leurs commentaires judicieux et leurs suggestions, qui ont contribué à bonifier ce rapport de projet. Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers Isabelle Winter pour sa précieuse révision linguistique.

Aspects éthiques et indépendance de la recherche

Ce rapport de recherche a été financé par le groupe MISA. Toutefois, ce rapport a été réalisé en toute indépendance et il n'engage que ses auteurs. Il ne représente donc aucunement le point de vue du CIRANO ou de toutes autres parties prenantes. De plus, les entretiens individuels réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont été faits de façon anonyme et confidentielle conformément au certificat d'approbation émis par le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de Polytechnique Montréal.

Sommaire exécutif

Les deux objectifs de ce projet de recherche étaient d'identifier et d'analyser les facteurs qui facilitent ou freinent l'adoption de technologies innovantes lors de l'évaluation des projets privés d'investissements miniers en phase d'exploitation ainsi que d'étudier le contexte actuel de la finance durable et les obligations de divulgation des critères ESG des entreprises et des investisseurs et évaluer leur impact potentiel sur l'adoption des technologies innovantes dans le secteur minier.

Le constat initial était que le secteur minier québécois était plutôt en retard en termes d'innovation, en comparaison avec les autres industries dans la province, mais également par rapport aux compagnies minières ontariennes. À la lumière des données disponibles dans la littérature scientifique ainsi que dans les différentes banques de données, il semblerait qu'il soit nécessaire de contribuer, à travers ce projet, à une mise à jour des connaissances à ce sujet, notamment à la suite des bouleversements économiques des cinq dernières années. L'investissement minier au Québec atteint des niveaux proches du dernier pic de 2012 et le secteur est en effervescence devant les opportunités reliées à l'exploitation des minéraux critiques et stratégiques (MCS).

Le premier volet de ce rapport s'appuie sur une revue des écrits scientifiques sur l'innovation dans le secteur minier et la finance durable. Il permet d'établir une base de connaissances qu'il est possible de questionner à travers le deuxième volet de ce rapport qui concerne la consultation des acteurs du secteur. Trente personnes ont été rencontrées à travers des entrevues semi-dirigées (encadrées par un certificat éthique). Plus de 50 autres rencontres informelles, dans différents événements du secteur, ont permis d'alimenter la réflexion de l'équipe de recherche.

Il est clair que l'innovation dans le secteur minier a un potentiel de bénéfices non négligeables selon la littérature. Les innovations peuvent notamment générer des avantages compétitifs et notamment des économies de coûts, une meilleure efficacité et un accroissement de la productivité. Ce sont des éléments tangibles que les entreprises minières pourraient être capables de mesurer. Il existe également des avantages plus difficiles à mesurer financièrement, mais tout aussi importants comme la réduction des risques santé/sécurité, la réduction des risques environnementaux et la réduction des risques réputationnels. Par ailleurs, l'examen des données de Statistique Canada révèle que les entreprises minières au Québec adoptent autant, voire plus, d'innovations de procédés que celles de l'Ontario et de l'ensemble du Canada. Bien que les entreprises minières québécoises semblent moins enclines à innover que leurs homologues du secteur manufacturier, la réalité montre une adoption robuste d'innovations dans le contexte plus large de l'industrie minière nationale.

Cependant, il paraît tout de même pertinent de se poser la question des facteurs qui bloquent ou au contraire facilitent l'adoption de ces innovations si les bénéfices semblent établis dans la littérature. Trois catégories de facteurs explicatifs ont été identifiées dans ce rapport.

Premièrement, les caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière peuvent apporter de premiers éléments d'explication. En effet, le secteur minier est très intensif en capital sur des durées de fonctionnement assez courtes (dizaine d'années). De plus, l'industrie est très exposée aux prix de marchés mondiaux et la dynamique reste cyclique. L'éloignement géographique des gisements miniers génère également de nombreuses difficultés en lien avec l'accès à l'hydroélectricité et les axes de transports. Les étapes du processus de développement minier ajoutent également une complexité en lien avec un fonctionnement en silo souvent décrié par les personnes rencontrées. Deuxièmement, le contexte organisationnel particulier de l'industrie minière s'accompagne de plusieurs défis. Dans une industrie aussi contrainte, la gestion des risques est une boussole et l'incertitude et les risques liés aux technologies émergentes non éprouvées dissuadent les investissements. À cela s'ajoute une aversion aux pertes très forte, exacerbée par les systèmes de performance et de reconnaissance axés sur l'efficacité et l'efficacité au détriment de la créativité et de l'apprentissage. L'industrie n'est également pas épargnée par les enjeux de main-d'œuvre qui sont même décuplés, avec une population de travailleurs vieillissante et accoutumée à des méthodes ancrées. Dernièrement, l'écosystème particulier de l'industrie au Québec réunit différents acteurs ayant des intérêts parfois divergents, notamment en lien avec la gouvernance des données. S'il est admis que les données vont être clés pour la transformation de l'industrie, plusieurs obstacles doivent encore être franchis entre la responsabilité des équipementiers, des prestataires et des compagnies minières au sujet des données générées par les activités.

Enfin, la démocratisation des facteurs ESG dans l'industrie minière pourrait s'accompagner de nouveaux enjeux si la préparation des entreprises n'est pas complète. La pression croissante sur les investisseurs d'augmenter la transparence sur la composition de leurs portefeuilles pourrait se répercuter sur les entreprises de tout secteur. Les entreprises minières seront néanmoins d'autant plus concernées que la licence sociale d'opérer est primordiale pour la continuité des activités. Aux enjeux connus d'émissions de gaz à effet de serre s'ajoute désormais une transparence accrue sur les impacts sur les populations, la main-d'œuvre ou la nature environnant le site minier. Malgré le fait qu'il n'y ait pas de consensus scientifique sur les liens qu'il est possible d'établir entre « bonne performance ESG » et « performance financière », il apparaît que de mauvaises pratiques ESG sont dommageables. Ces efforts pourront être accomplis par un suivi précis des données ESG et une transparence s'appuyant sur des cadres de divulgation communs aux différentes industries.

Il paraît donc primordial de considérer préférentiellement d'investir dans des technologies durables, de favoriser la collaboration avec l'ensemble des acteurs de l'industrie et de se préparer à une transparence accrue sur les critères ESG autour d'un cadre commun à toutes les industries.

MISE EN CONTEXTE

1 Introduction

Le secteur minier québécois, en tant que source de richesses naturelles et de création d'emplois, joue un rôle important dans la contribution au PIB pour la province. Toutefois, il est confronté à plusieurs pressions et évolutions qui nécessitent une adaptation rapide. L'une de ces pressions découle de la demande croissante pour certains métaux et minéraux disponibles au Québec (fer, cuivre, zinc, lithium, graphite ou encore terres rares par exemple), tant sur le marché national qu'international (IEA, 2021). Cette demande soutenue place le secteur dans une position favorable, mais impose également des défis en matière d'efficacité et de rentabilité aux entreprises minières.

De plus, les entreprises minières sont de plus en plus confrontées aux impératifs de durabilité et aux attentes en matière de responsabilité sociale et environnementale. Les considérations environnementales, sociales et de gouvernance (ESG) sont au cœur de l'agenda des parties prenantes, y compris des investisseurs, des régulateurs et du grand public. En effet, les défis des changements climatiques, et les enjeux ESG plus généralement, mettent de la pression sur la responsabilité sociale des entreprises et de leurs investisseurs, notamment à travers l'obtention et le respect de la licence sociale d'opérer. On parle de plus en plus d'énergies renouvelables et de « mines vertes ». Ceci peut amener des demandes pour de nouvelles façons de faire, aussi bien pendant les phases d'exploration et d'exploitation que de traitement.

« L'ESG n'est plus facultatif ou un point de différenciation ; c'est désormais la norme minimale de fonctionnement. Les parties prenantes augmentent la pression, et des licences sociales solides, des désinvestissements responsables et de la transparence fiscale seront importants pour réussir », peut-on lire dans le plus récent bilan de PwC sur l'industrie minière mondiale (PwC, 2022).

D'ailleurs, les enjeux ESG demeurent la principale source de risques et d'opportunités dans le secteur des mines et des métaux, selon les répondants à l'enquête de EY « *Top 10 business risks and opportunities for mining and metals* » réalisée entre juin et août 2022 auprès d'exécutifs du secteur (EY, 2022). Dans ce contexte, l'adoption de technologies innovantes pourrait potentiellement permettre au secteur minier de réduire son empreinte environnementale, d'améliorer la sécurité des travailleurs et de répondre aux normes ESG de manière plus proactive.

L'industrie minière est actuellement en pleine mutation, devenant notamment de plus en plus axée sur la génération et l'analyse de données, en lien direct avec l'avènement de l'industrie 4.0 et de la transformation numérique. La multiplication des capteurs sur les équipements et les infrastructures minières signifie que des volumes considérables de

données peuvent être collectés et exploités, pour autant que des décisions d'investissement judicieuses soient prises. Ces données ouvrent la porte à diverses applications : maintenance prédictive, optimisation des horaires et des déplacements, visualisation des activités, véhicules autonomes, etc. À l'instar de diverses industries, le secteur minier aspire à tirer profit de cette évolution pour améliorer son efficacité, particulièrement face à la demande croissante de certains métaux, à l'exploitation de gisements de métaux critiques et stratégiques (MCS), aux défis liés à la main-d'œuvre et aux bouleversements causés par les changements climatiques.

Cependant, la transition vers des technologies innovantes dans le secteur minier n'est pas sans obstacle. Le potentiel de ces technologies est bien connu, mais les impacts réels (financiers et non financiers) et le retour sur investissement (R.O.I), notamment la valeur des données, semblent difficiles à évaluer pour les gestionnaires et les investisseurs, ce qui pourrait freiner l'adoption de pratiques d'investissements appropriées. On observe le plus souvent qu'une fois la preuve de concept établie, les innovations sont plus rapidement adoptées par les autres opérateurs. Pourtant, l'adoption de solutions innovatrices par l'industrie minière pour augmenter la production, et surtout pour augmenter la durabilité des mines, est maintenant devenue incontournable. Le Gouvernement du Canada a d'ailleurs annoncé un investissement en 2021 pour permettre de créer le Réseau de l'Accélérateur de commercialisation d'innovation minière, dont le Groupe MISA fait partie (gouvernement du Canada, 2021).

Dans l'ensemble du secteur, nous constatons que les entreprises minières intègrent de plus en plus les facteurs ESG dans leurs stratégies, leurs décisions et les rapports qu'elles produisent, car cette question devient une priorité pour toutes les parties prenantes.

Le secteur minier se distingue toutefois d'autres secteurs industriels en raison du processus de développement minéral qui lui est propre. Le cheminement d'un projet minier n'est pas linéaire (MRNF, 2023d). La courbe d'adoption des technologies dépend de la position sur le cycle de vie d'un gisement, ce qui présente un défi pour mobiliser le capital requis et a un impact aussi sur la capacité au démarrage. Ces projets sont également en concurrence avec d'autres projets d'investissement. L'approche des investisseurs privilégierait donc le choix de technologies existantes plutôt que de technologies innovantes pour réduire le risque financier du projet.

Toutefois, la demande croissante pour une finance responsable, et notamment la divulgation des impacts ESG des portefeuilles d'investissement, a de plus en plus d'impact sur les décisions d'investissement ce qui devrait pousser les investisseurs à faire un suivi lors de la mise en valeur du projet, et non plus seulement par l'expert en environnement. Cela voudrait dire aussi que les investisseurs seront de plus amenés à évaluer les flux des ESG en même temps que les flux des rendements privés et envisageront les choses

différemment (investissement plus cher, mais plus efficace, moins polluant, etc.). Le secteur minier semble donc à la croisée des chemins, cherchant à équilibrer innovation et tradition.

1.1 Objectifs de l'étude et méthodologie générale

Le Groupe MISA a chargé le CIRANO de mener un projet de recherche visant à approfondir la compréhension des mécanismes de prise de décision concernant les investissements dans des technologies novatrices au sein de l'industrie minière québécoise. Plusieurs questions se posent : quels sont les obstacles qui entravent l'adoption de technologies innovantes dans le secteur minier québécois ? Est-ce que les considérations ESG influencent, ou pourraient influencer, le processus décisionnel d'investissement ?

Cette étude se penche sur ces questions et approfondit la compréhension des mécanismes de prise de décision concernant les investissements dans des technologies novatrices au sein de l'industrie minière québécoise, dans un contexte de transformation numérique et dans un contexte ESG en constante évolution. En analysant ces facteurs, cela permet d'éclairer les opportunités et les défis qui façonneront l'avenir de l'industrie minière québécoise. La recherche se concentre sur la phase d'exploitation, les phases d'exploration et de mise en valeur ne sont donc pas abordées dans ce projet, ni les phases de restauration et de suivi.

Plus précisément, deux objectifs ont été établis pour ce projet :

- analyser les facteurs qui facilitent ou freinent l'adoption de technologies innovantes lors de l'évaluation des projets privés d'investissements miniers ;
- étudier le contexte actuel de la finance durable incluant les obligations de divulgation des entreprises et des investisseurs et évaluer son impact potentiel sur l'adoption des technologies innovantes dans le secteur minier.

Afin de répondre à ces deux objectifs, l'équipe de recherche du CIRANO a adopté une approche économique qui élargit l'analyse au-delà des seules considérations financières et prend en compte les implications économiques et sociétales de l'innovation dans l'industrie minière.

Le projet se décompose en deux grands volets : une revue de la littérature et des entrevues auprès des acteurs du secteur minier ou qui gravitent autour de ce secteur.

Pour le premier volet, la méthodologie adoptée a consisté en la création d'une base de connaissances solide sur l'innovation dans l'industrie minière en général, ainsi que sur les

processus de prise de décision en matière d'investissements miniers. Une analyse approfondie du contexte de divulgation des critères ESG et des spécificités reliées au secteur minier a également été menée. L'ensemble de ces analyses documentaires ont pour objectif non seulement de broser un portrait des connaissances existantes, mais également d'établir les enjeux et les limites de ces connaissances. Il s'agissait avant tout de faire un état des lieux de l'innovation dans l'industrie minière.

Pour compléter cette analyse, le deuxième volet présente des entrevues semi-dirigées et des consultations qui ont été réalisées auprès d'entreprises minières et de parties prenantes gravitant autour du site minier, telles que des investisseurs, des équipementiers, des consultants, des communautés locales et autochtones ou encore le gouvernement. Ces entretiens ont revêtu une importance capitale à plusieurs égards. Pour commencer, ils ont permis d'actualiser les constats issus de la littérature, qui se réfèrent généralement à des informations collectées jusqu'en 2021. Cela était d'autant plus important compte tenu des changements significatifs survenus ces dernières années dans le domaine des technologies innovantes et du fait que l'industrie semble se mobiliser très rapidement avec une courbe d'apprentissage très rapide. Ainsi, ces entretiens ont facilité la mise à jour des constats en s'appuyant sur les données disponibles les plus récentes. De plus, ces entretiens ont permis de confirmer, réfuter ou tout du moins nuancer des éléments présents dans la littérature dans un contexte québécois. Ils ont également contribué à mettre en lumière les points de convergence ou de divergence entre les divers acteurs du secteur et à aborder les questions en suspens tout en dissipant les zones d'incertitude. Les détails méthodologiques relatifs à chacune de ces étapes seront présentés dans les sections appropriées du rapport.

1.2 Plan du rapport

Le rapport adopte une structure chronologique qui reflète la méthodologie de recherche utilisée pour les deux volets : une revue de la littérature (volet 1) et une consultation de différents acteurs du secteur minier (volet 2), chacune comprenant plusieurs chapitres. Ces deux volets principaux sont précédés d'une partie de mise en contexte avec des données générales sur l'industrie minière au Québec. Ce chapitre établit une base en présentant une description de l'industrie minière au Québec, mettant en évidence les caractéristiques économiques du secteur. Il offre également des données pertinentes sur les initiatives innovantes dans le secteur minier. En outre, des données du Baromètre CIRANO présentent les perceptions des Québécois sur le secteur minier sur les 10 dernières années. Le rapport se termine par un chapitre sur des pistes de réflexion et une discussion.

Figure 1 : Plan du rapport de recherche



Les deux volets du rapport sont structurés de manière parallèle, avec chacune de leurs sous-sections correspondant à une section équivalente dans l'autre partie. Chacun de ces volets se concentre sur l'influence des variables sur l'adoption d'innovations. Tout d'abord, elles explorent la manière dont l'innovation se déploie dans un environnement caractérisé par les spécificités économiques inhérentes au secteur minier, une structure organisationnelle propre à ce secteur, un écosystème spécifique, et enfin, dans le contexte des considérations ESG. Ces quatre éléments jouent un rôle crucial dans la compréhension des obstacles et des incitatifs à l'innovation. Il est important de noter que la transformation numérique actuelle agit comme un facteur catalyseur de l'innovation, et nous examinerons plus en détail ce concept lors de la discussion sur les écosystèmes d'innovation.

Les deux volets se complètent aussi en termes de contenu.

Le premier volet, basé sur la recension des écrits, vise à faire un état des lieux des connaissances en identifiant les limites des connaissances actuelles et les éléments qui doivent être validés pour l'écosystème québécois. Certains facteurs limitant l'innovation ont été observés à l'échelle mondiale, et il est pertinent de les confronter aux réalités propres à l'industrie minière québécoise. Il en va de même pour les facteurs ESG, dont le développement peut varier entre le contexte mondial et la situation au Québec, en particulier dans le secteur minier.

Le deuxième volet, basé sur des entretiens avec les parties prenantes de l'industrie minière, vise à apporter des réponses aux questions soulevées dans la littérature.

2 Mise en contexte avec des données générales sur l'industrie minière au Québec

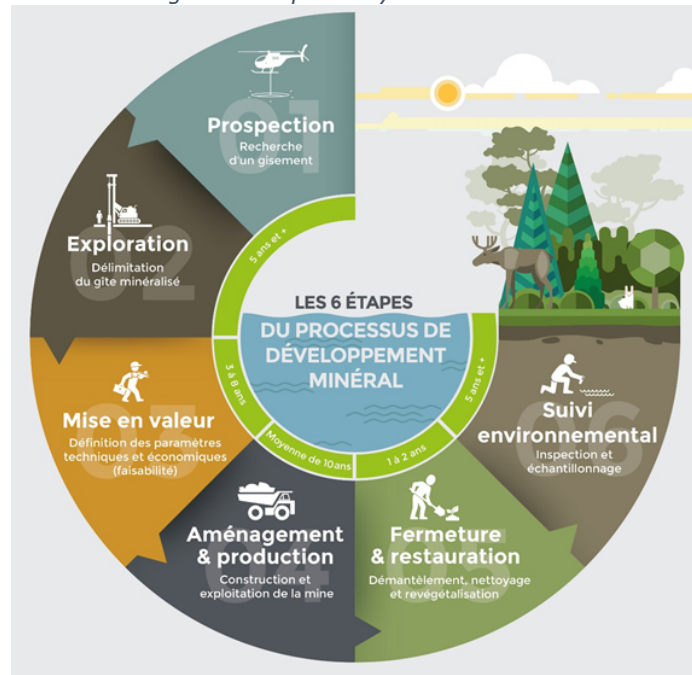
Nous allons présenter le secteur minier québécois à travers différentes données publiques ainsi qu'à travers des résultats uniques et inédits issus des enquêtes du Baromètre CIRANO des dix dernières années sur la perception des risques liés à de grands enjeux de société, et plus particulièrement sur l'acceptabilité sociale du secteur minier (pour consulter le site du Baromètre : www.barometre.cirano.qc.ca).

2.1 Présentation de l'industrie minière au Québec

L'industrie minière québécoise se répartit principalement entre l'exploration et l'exploitation minière. La première catégorie couvre les activités consistant en la recherche et la découverte de gisements miniers, puis à leur mise en valeur pour s'assurer qu'ils atteignent des critères d'exploitation économique. L'exploitation minière, quant à elle, consiste à extraire et traiter du minerai sur un site où le potentiel économique du gisement est prouvé.

L'Association minière du Québec (s. d.) détaille plus précisément l'enchaînement des étapes du cycle de vie minier. Les étapes de prospection et d'exploration visent à identifier un potentiel gisement, à en délimiter les caractéristiques et à définir s'il peut devenir un gîte. S'ensuit alors une période de 3 à 8 ans de mise en valeur du gisement. L'étape de la production se traduit par l'aménagement du site minier, puis de l'exploitation des ressources identifiées. En parallèle, des usines de traitement de minerais peuvent être adjacentes au site d'exploitation. Enfin, lorsque l'exploitation est terminée, le site doit être fermé et restauré selon les engagements initiaux pris par l'entreprise qui a exploité le site. Un suivi environnemental de la zone est également mis en place dans les années suivantes. Ces étapes sont représentées dans la Figure 2.

Figure 2 : Étapes du cycle de vie minier

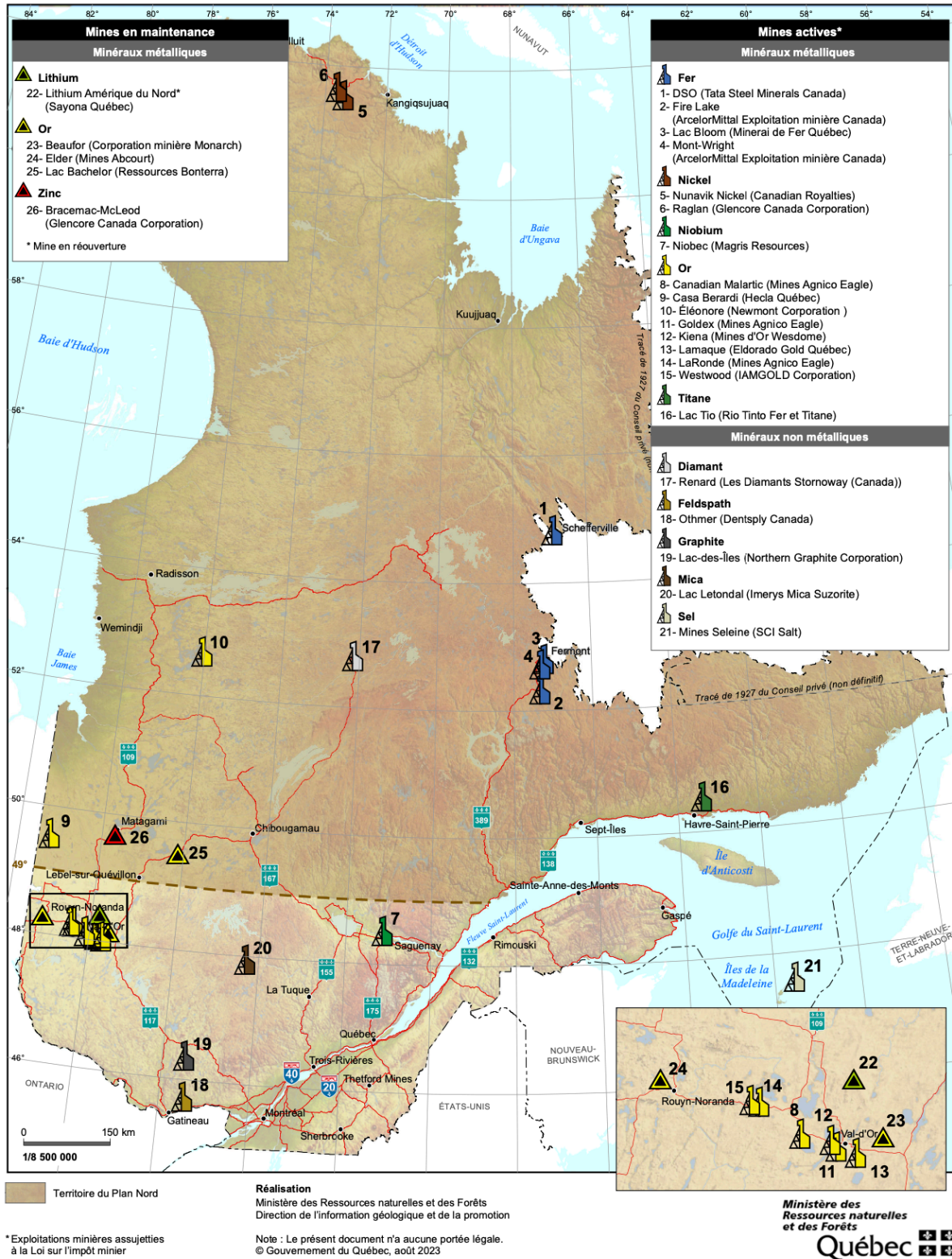


Source : (AMQ, s. d.)

Au Québec en 2023, les différents minerais en exploitation sont le cuivre, le diamant, le feldspath, le fer, le graphite, le lithium, le mica, le nickel, le niobium, l'or, le sel, le titane et le zinc.

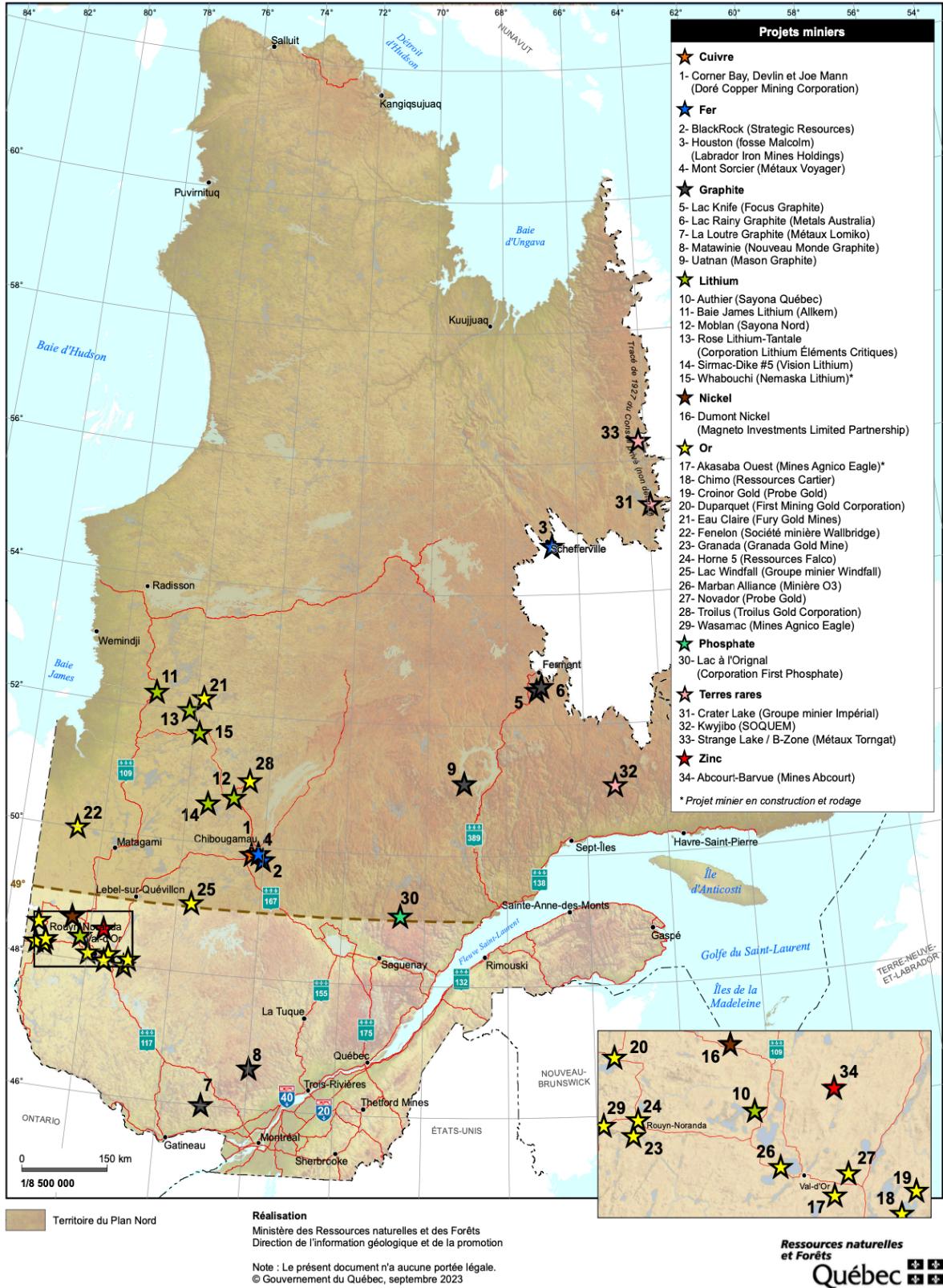
L'industrie minière du Québec est en grande partie concentrée dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, qui est riche en ressources minérales. Il y a des mines actives dans d'autres régions du Québec, principalement la Côte-Nord et le Nord-du-Québec (Comité sectoriel de la main-d'œuvre de l'industrie des mines, 2021 ; Mines Canada, 2019). La répartition régionale des sites miniers actifs et en maintenance en 2023 est présentée cartographiquement à la figure 3. Les projets miniers en cours de développement au Québec en 2023 sont, quant à eux, présentés à la figure 4.

Figure 3 : Carte des mines actives et en maintenance au Québec, 2023



Source : (MRNF, 2023a)

Figure 4 : Carte des projets miniers au Québec, 2023



Source : (MRNF, 2023b)

Ces nouveaux projets et ces projets en développement suscitent toujours de vives réactions de la part des populations environnantes mettant en évidence l'importance cruciale de l'acceptabilité sociale des projets miniers pour garantir la pérennité des opérations minières au Québec. L'encadré dans les pages qui vont suivre présentera les données exclusives du Baromètre CIRANO concernant la perception de l'industrie minière par les Québécois (De Marcellis-Warin, N. et coll., 2022).

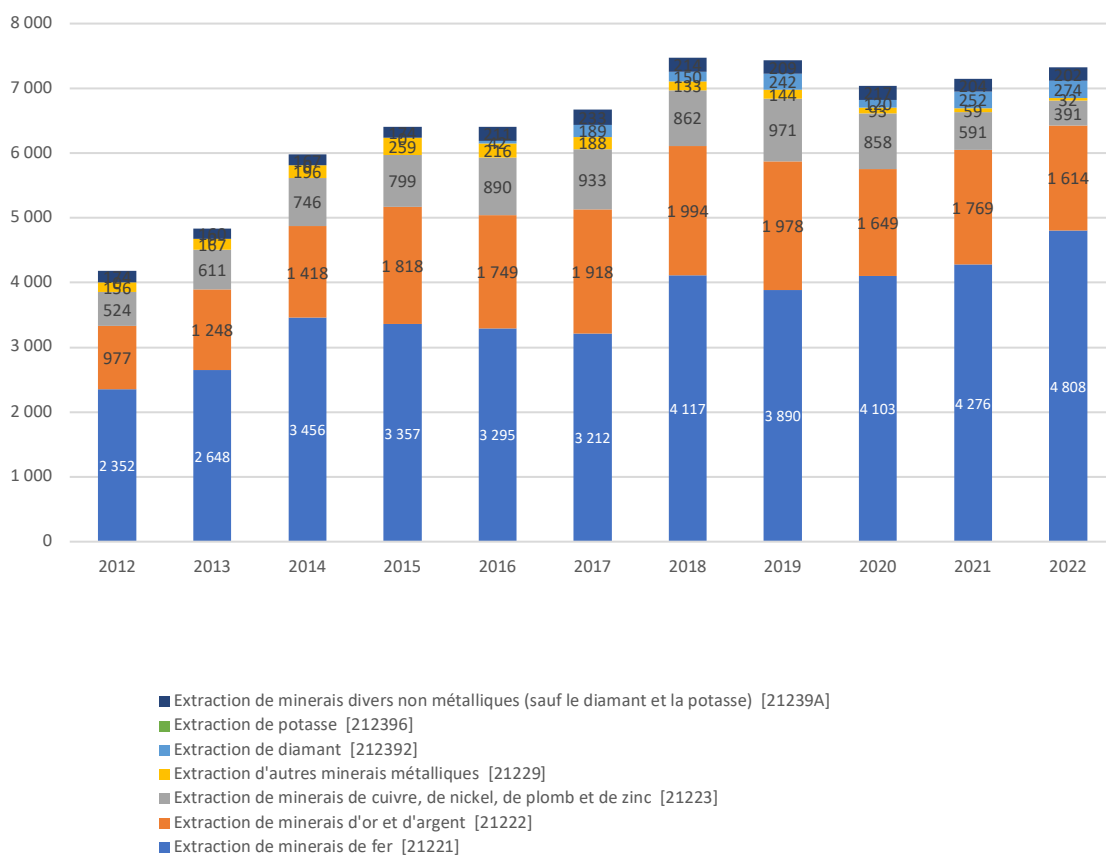
2.2 Importance de l'extraction minière dans l'économie québécoise

L'industrie minière du Québec est une composante importante de l'économie de la province. En 2022, le PIB de l'industrie de l'extraction de minerais métalliques (SCIAN 2122) et d'autres minerais non métalliques (SCIAN 21239) s'élevait à 7 320 milliards de dollars¹, ce qui représente en proportion presque 2 % du PIB de l'ensemble des industries au Québec (Statistique Canada, 2023d).

¹ La valeur équivaut à la somme des sous-catégories de l'industrie du code SCIAN 2122 : Extraction de minerais de fer (SCIAN 21221), Extraction de minerais d'or et d'argent (SCIAN 21222), Extraction de minerais de cuivre, de nickel, de plomb et de zinc (SCIAN 21223), Extraction d'autres minerais métalliques (SCIAN 21229) et des sous-catégories de l'industrie du code SCIAN 21239 : extraction de diamant (SCIAN 212392), extraction de potasse (SCIAN 212396) et l'industrie SCIAN 21239A qui regroupe les codes 212393 (Sel), 212394 (amiante), 212395 (gypse), 212397 (tourbe), 212398 (tous les autres minerais non métalliques) du Système de classification des industries. *Source : Tableau : 36-10-0402-01 Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, par industries, provinces et territoires Statistique Canada consulté le 21 octobre 2023.*

Figure 5 : Évolution du PIB de l'industrie de l'extraction de minerais

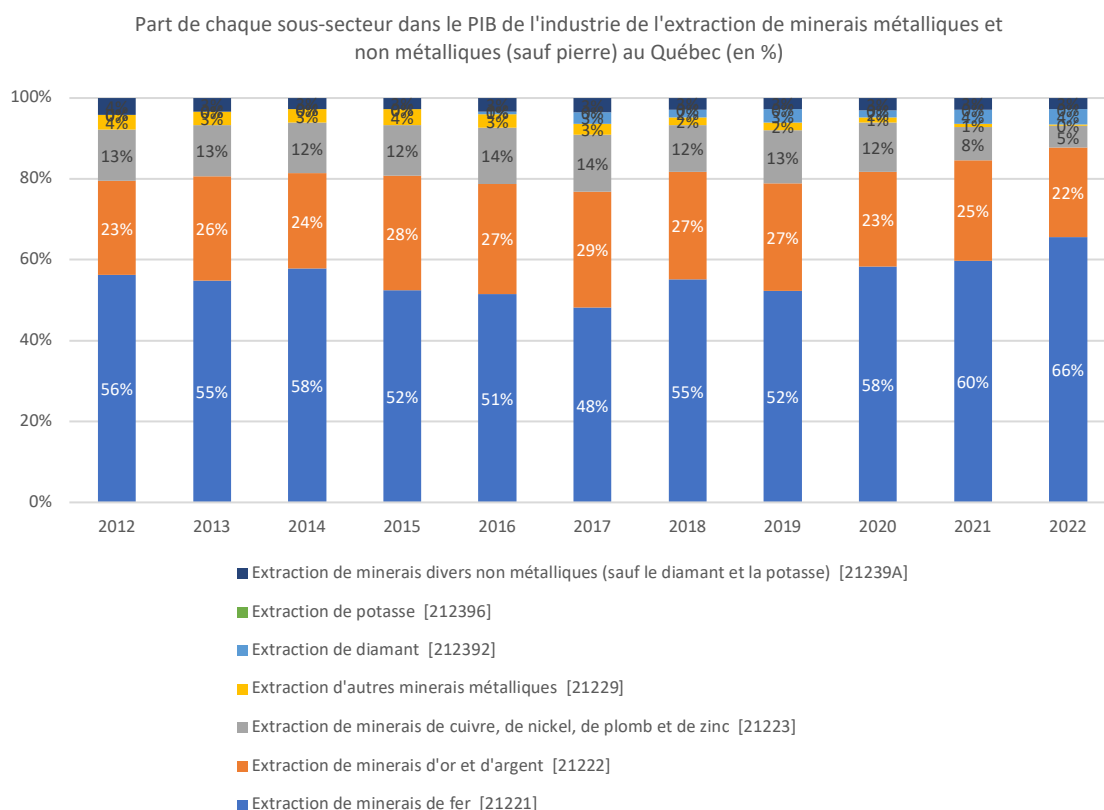
PIB de l'industrie de l'extraction de minerais métalliques et non métalliques (sauf pierre) au Québec de 2012 à 2022 (en M\$ courants)



Source : (Statistique Canada, 2023d)

Entre 2012 et 2022, la principale industrie contributrice au PIB minier demeure l'extraction de minerais de fer, entre 48 et 66 % selon les années.

Figure 6 : Part de chaque sous-secteur dans le PIB de l'industrie de l'extraction de minerais métalliques et non métalliques (sauf pierre) au Québec (en %)



Source : (Statistique Canada, 2023d)

Le montant des livraisons (correspondant au total des produits sortant de l'établissement (expéditions + transferts sortants)) constitue aussi une mesure majeure de la production minière au Québec (MRNF, 2023c). Dans son rapport de 2023, l'ISQ précise que le montant des livraisons des entreprises regroupées sous le code SCIAN 2122 – extractions de minerais métalliques – s'élève à plus de 11,9 milliards de dollars en 2021 et de 0,2 milliard de dollars pour l'extraction d'autres minerais non métalliques (SCIAN 21 239) pour un total de 12,1 milliards de dollars.

Le secteur de l'extraction minière (Codes SCIAN 2122 et 21239) emploie au total 11 199 personnes, dont 70 % sont des emplois directs. Les salaires, traitements et commissions s'élèvent quant à eux à plus de 1,34 milliard de dollars au Québec (Institut de la statistique du Québec, 2023).

Tableau 1 : Quelques statistiques des industries de l'extraction minière pour les minerais métalliques (2122) et certains minerais non métalliques (21 239), Québec

	2021
LIVRAISONS	12 127 766 k\$
EMPLOI	
Emploi total	11 199
<i>Direct</i>	<i>7 785</i>
<i>Indirect</i>	<i>3 414</i>
SALAIRES	
Salaires, traitements et commissions	1 335 209 k\$
Salaires, traitements et commissions par employé	119 k\$/n

Source (Institut de la Statistique du Québec, 2023)

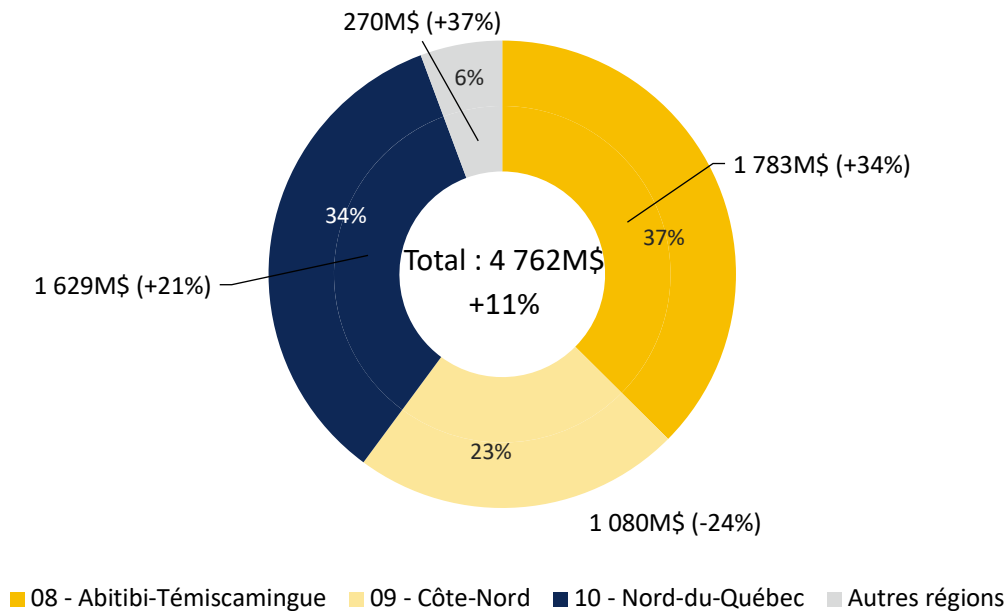
2.3 Les investissements dans l'industrie minière au Québec

Voyons maintenant plus en détail les données entourant les investissements dans le secteur minier en utilisant les données de *l'Enquête annuelle sur l'investissement minier* qui a été faite au cours des trois premiers trimestres de 2023 auprès de 376 sociétés minières et visait à recueillir les données définitives de 2022 et les intentions pour 2023.

2.3.1 Répartition de l'investissement par région

En 2022, les trois grandes régions minières (Abitibi-Témiscamingue, Nord-du-Québec, Côte-Nord) ont reçu 94,3 % de l'investissement minier du Québec, selon l'Institut de la Statistique du Québec (Madore, 2023). La répartition de l'investissement minier évolue rapidement au Québec. En ce sens, le Nord-du-Québec a connu une hausse de 21,5 % des investissements en 2022, et une hausse de 33,7 % pour l'Abitibi-Témiscamingue. Le graphique suivant donne une meilleure idée de la répartition de l'investissement minier. Les pourcentages représentent la variation par rapport à l'année précédente, soit 2021 (Madore, 2023).

Figure 7 : Répartition de l'investissement minier par régions administratives et évolution par rapport à 2021, Québec, 2022 (M\$)



Source : (Madore, 2023), graphique des auteurs

2.3.2 Répartition de l'investissement par catégories de dépenses

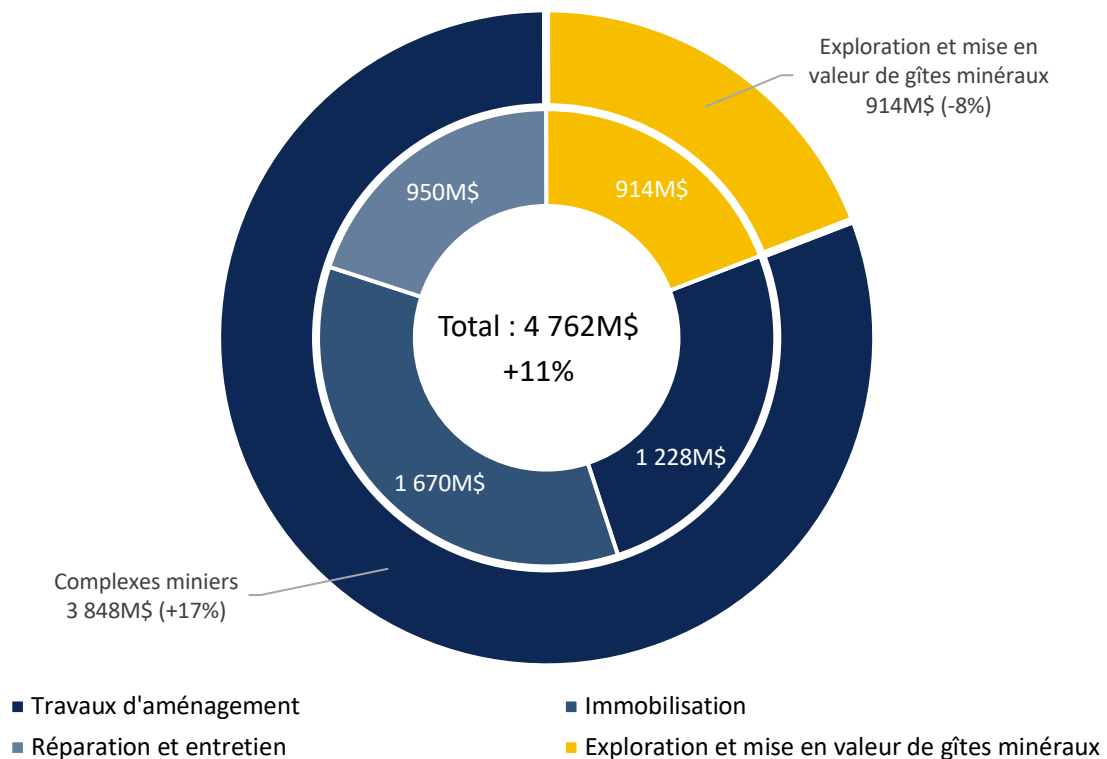
Il est important de définir les catégories de dépenses dans un contexte de projets miniers (Madore, 2022) :

- **Les dépenses d'exploration** : elles font référence à toutes les activités entreprises sur ou en dehors d'un site minier pour rechercher et découvrir des gisements minéraux, effectuer leur première délimitation et estimer leur potentiel économique en matière de tonnage, teneur et autres caractéristiques, ainsi que pour justifier la réalisation de travaux plus détaillés et approfondis.
- Les **dépenses engagées pour la mise en valeur d'un gisement minéral** comprennent toutes les activités réalisées sur ou en dehors d'un site minier dans le but d'acquérir une connaissance approfondie d'un gîte déjà délimité et de répondre aux exigences d'une étude de faisabilité.
- Par la suite, l'exploitation du complexe minier démarre véritablement. Les **dépenses en travaux d'aménagement** englobent les activités qui permettront de délimiter et définir en détail le minerai, pour y avoir accès et en préparer l'extraction, et pour maintenir ou augmenter les réserves de minerai.

- Ensuite, les **dépenses en immobilisation** comprennent tout ce qui a trait à la construction des infrastructures nécessaires au complexe minier incluant les usines comme le bouletage et les concentrateurs de minerais, les parcs à résidus, etc. L'achat d'équipement et d'outillage en fait aussi parti.
- Enfin, les **dépenses d'entretien et de réparation** sont composées de tout ce qui touche l'entretien des infrastructures, outils et équipements.

La majorité (3 848 M\$) de ce montant est investie dans les complexes miniers que ce soit pour l'aménagement, l'immobilisation ou la réparation et l'entretien. Le reste de l'investissement, soit 914 M\$, va dans l'exploration et la mise en valeur des gîtes de minéraux. Globalement, l'investissement minier total a augmenté de 11 % par rapport à 2021 (Madore, 2023). La prévision initiale de l'investissement minier en 2022 était de 4 231 milliards de dollars, soit une baisse de 1,5 % (Madore, 2022). La réalité a donc été plus positive.

Figure 8 : Répartition des dépenses d'investissement minier et variation par rapport à 2021, Québec, 2022 (M\$)



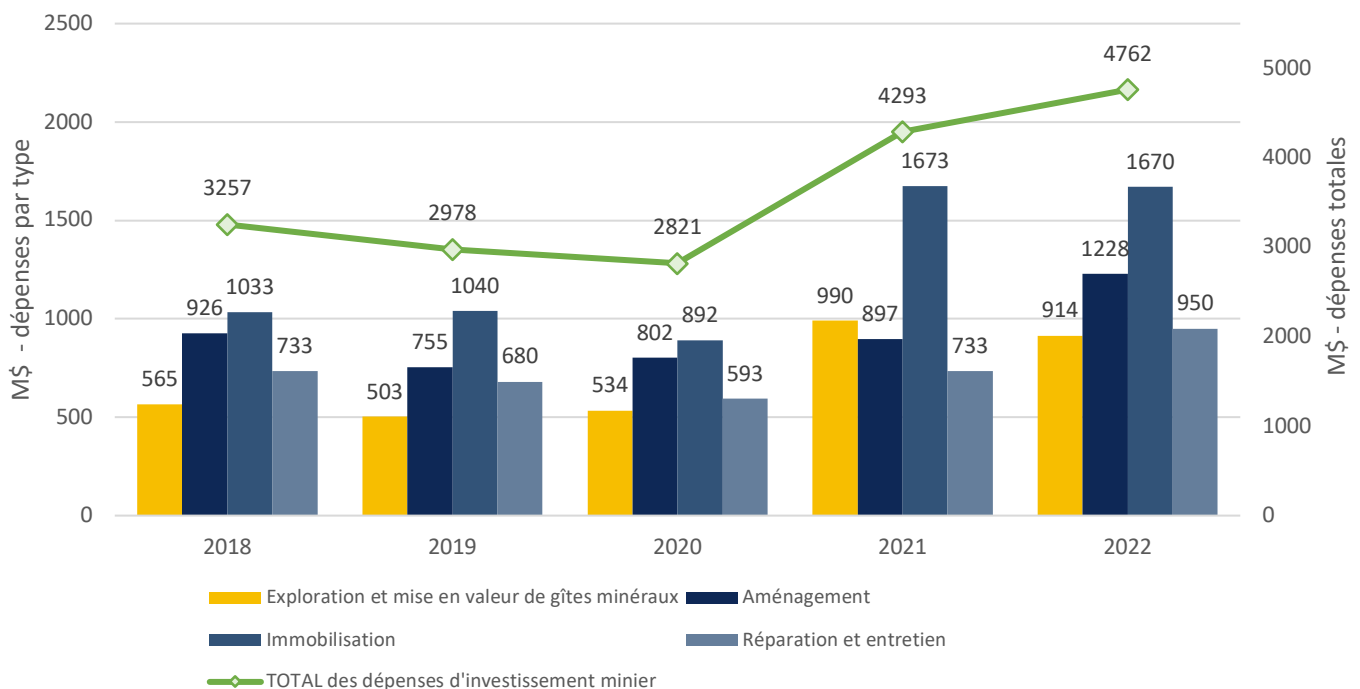
Source : (Madore, 2023), graphique des auteurs

Les dépenses liées aux complexes miniers, y compris l'aménagement, l'immobilisation, la réparation et l'entretien se décomposent comme suit :

- Dépenses d'immobilisation de 1 670 M\$, stable par rapport à 2021.
- Dépenses pour les travaux d'aménagement des installations minières de 1 228 M\$, soit une augmentation de 37 %.
- Dépenses pour les réparations et l'entretien des bâtiments non résidentiels, de la machinerie et de l'équipement de 950 M\$, soit une hausse de 30 %.

La figure suivante présente l'évolution des investissements miniers par type de dépenses depuis 2018.

Figure 9 : Répartition des dépenses d'investissement selon le type de dépenses au Québec depuis 2018

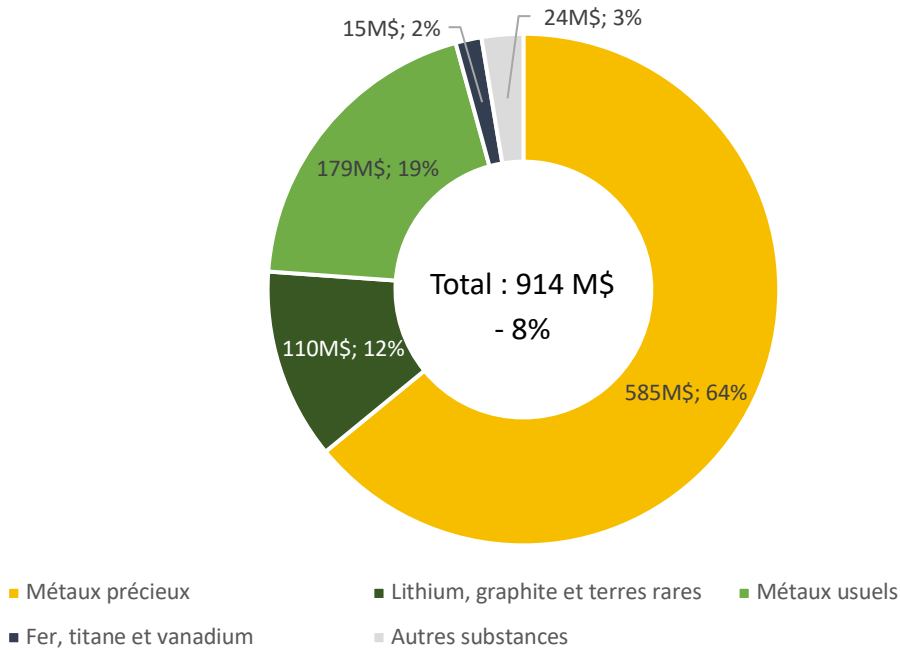


Source : Compilation de données de l'Institut de la Statistique du Québec – Enquête annuelle sur l'investissement minier (2018 – 2022)

2.3.3 Répartition des dépenses en travaux d'exploration selon le minerai

En 2022, la majorité des dépenses en travaux d'exploration était dirigée vers les métaux précieux (585 M\$, 64 %). Suivent ensuite les dépenses pour les métaux usuels, pour un cinquième des dépenses totales (179 M\$), puis le lithium, le graphite et les terres rares (110 M\$, 12 %). La Figure 10 présente la répartition des dépenses en investissement selon le type de mine.

Figure 10 : Répartition des dépenses en travaux d'exploration et de mise en valeur selon le minéral, Québec, 2022



Source : (Madore, 2023)

2.4 Données d'enquêtes sur l'innovation auprès d'entreprises du secteur minier au Québec en comparaison avec d'autres provinces canadiennes et d'autres secteurs industriels

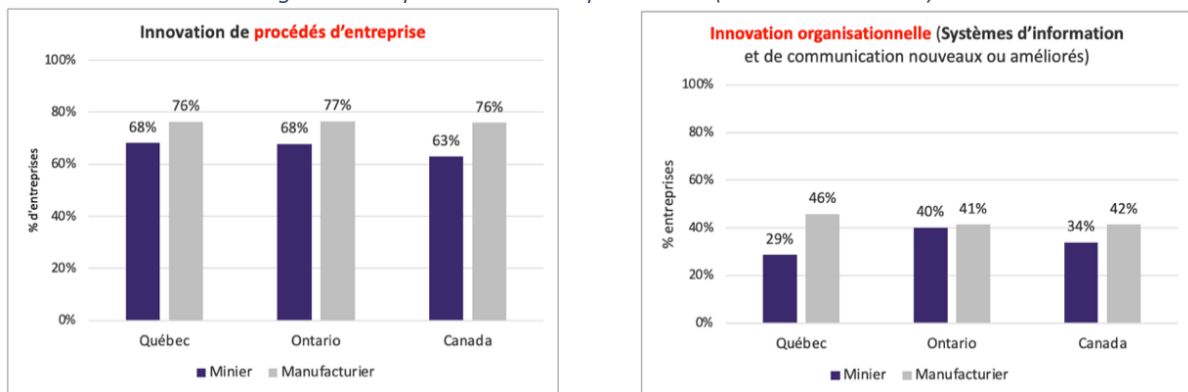
Au-delà des montants d'investissement, il paraît pertinent de s'intéresser aux innovations dans le secteur minier, car ce sont par les investissements que de nombreuses innovations sont mises en place. Pour ce faire, l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise de Statistique Canada apporte des éléments utiles pour positionner le secteur minier québécois par rapport aux autres industries et par rapport à d'autres provinces.

Cette enquête est menée tous les trois ans et les dernières données disponibles couvrent les deux périodes du 1^{er} janvier 2015 au 31 décembre 2017 et du 1^{er} janvier 2017 au 31 décembre 2019. La prochaine édition est prévue pour parution en février 2024 (Statistique Canada, 2023a). À partir des tableaux interactifs de la banque de données, nous pouvons comparer le secteur minier québécois à ses homologues pour certains éléments jugés pertinents.

Ainsi, alors que 76 % des entreprises manufacturières québécoises² témoignent de l'introduction d'innovations de procédés pour la période 2017-2019, cette proportion s'élève à 68 % pour les entreprises québécoises d'extraction minière et d'exploitation en carrière (excluant l'extraction de pétrole et gaz)³. Les compagnies minières ontariennes affichent également un taux de 68 %. En revanche, à l'échelle nationale, seulement 63 % des entreprises minières au Canada signalent des innovations en termes de procédés. Ainsi, bien que les entreprises minières québécoises semblent moins enclines à mettre en œuvre des innovations de procédés que leurs homologues du secteur manufacturier, elles en adoptent autant, voire davantage, que les entreprises minières de l'Ontario et de l'ensemble du Canada.

Si l'on s'intéresse maintenant aux innovations organisationnelles, les constats sont quelque peu différents : les entreprises minières ontariennes sont plus nombreuses à mentionner des innovations en lien avec les systèmes d'information et de communication nouveaux ou améliorés (40 % contre 29 % au Québec et 34 % pour le Canada dans son ensemble) et plus nombreuses également à mentionner des pratiques de gestion stratégique et générales nouvelles ou améliorées (54 % contre 21 % au Québec et 41 % pour le Canada dans son ensemble). Ainsi, les entreprises minières du Québec semblent non seulement accuser un retard en matière d'innovations organisationnelles par rapport au reste du Canada, mais également par rapport au secteur manufacturier québécois, où 46 % des entreprises indiquent avoir mis en place des systèmes d'information et de communication nouveaux ou améliorés au cours de la période 2017-2019.

Figure 11 : Comparaisons de données sur les innovations issues de l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprises de Statistique Canada (Période 2017-2019)



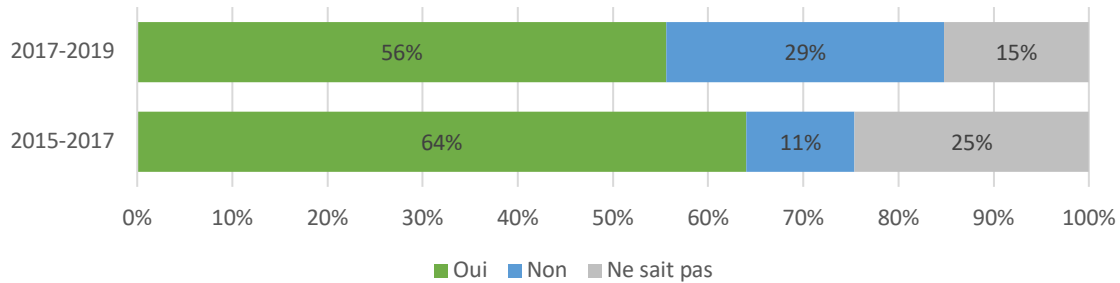
Source : (Statistique Canada, 2023a)

² Code SCIAN 31-33

³ Code SCIAN 212, inclut extraction minière et exploitation en carrière

Une autre section du questionnaire d'enquête aborde les économies de coûts générés par les innovations (Statistique Canada, 2023 c). Entre 2017 et 2019, au Québec plus de la moitié (56 %) des entreprises de ce secteur semblent constater des économies de coûts à la suite d'innovations de procédés, une proportion en baisse par rapport à 2015-2017 (64 %), mais proche de ce qui est observé en Ontario (55 % en 2017-2019).

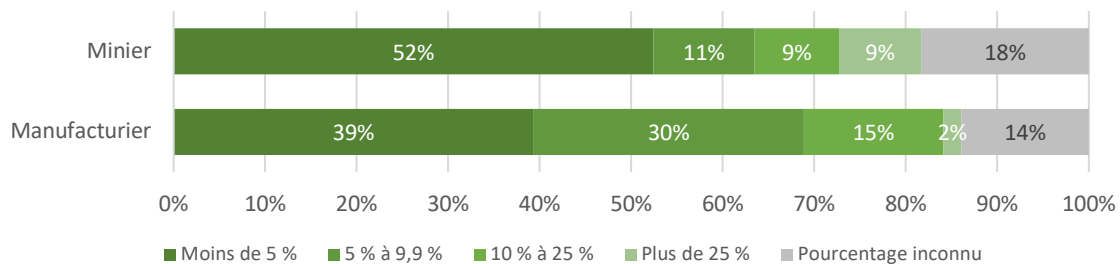
Figure 12 : Entreprises minières québécoises (SCIAN 212) constatant des économies de coûts engendrés par des innovations de procédés



Source : (Statistique Canada, 2023 c)

En 2019, une question a été ajoutée pour tenter de quantifier les réductions de coûts. 9 % des entreprises québécoises constatent des baisses de coûts de plus de 25 % dans le secteur minier, contre seulement 2 % dans le secteur manufacturier. Ces chiffres sont annoncés comme robustes par Statistique Canada. Il n'y a pas de possibilités de comparer ce chiffre avec l'Ontario, car les données ne sont pas assez fiables dans ce cas.

Figure 13 : Pourcentage de réduction de coûts observés à la suite d'une innovation de procédés au Québec⁴ (2017-2019)

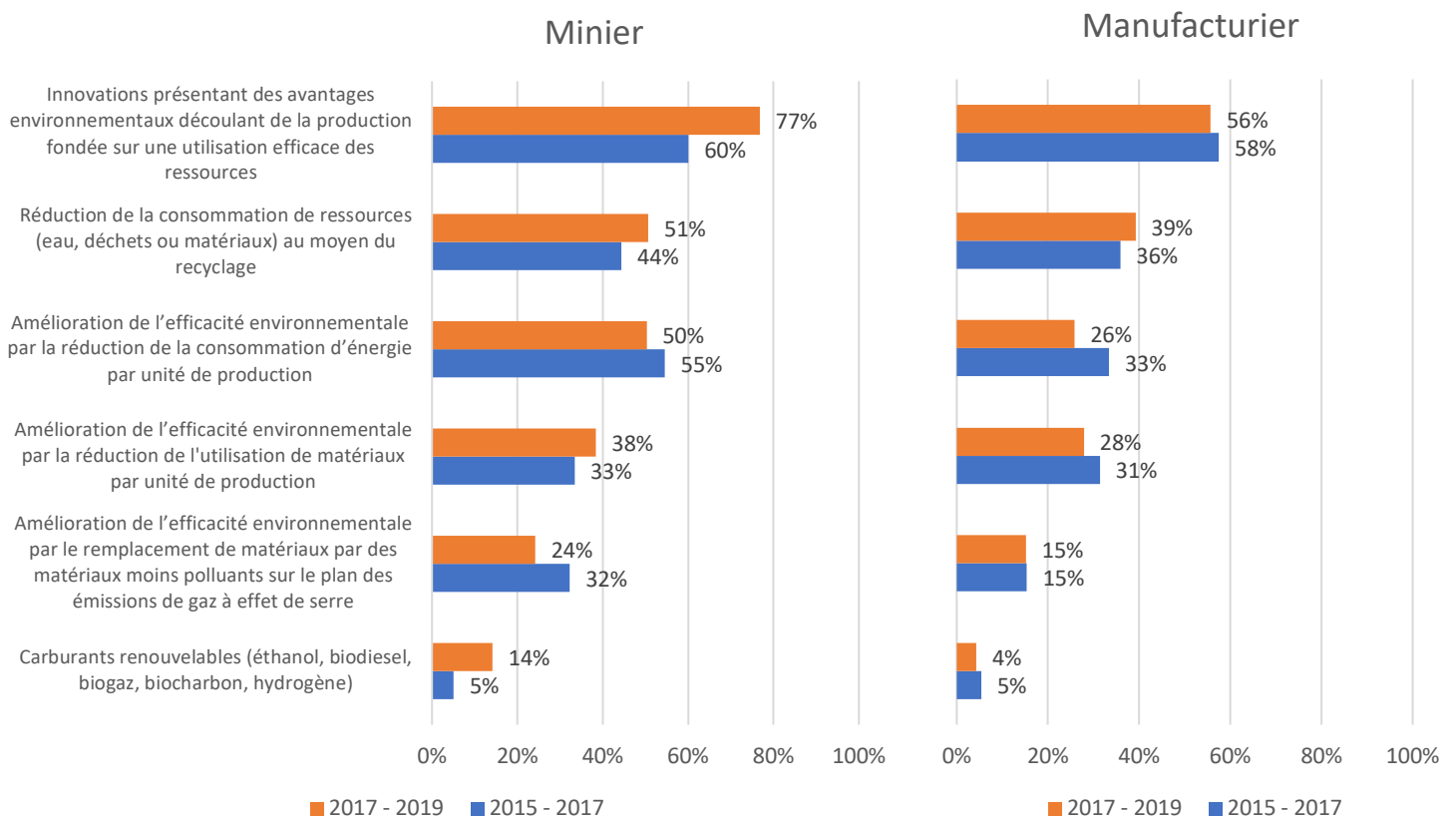


Source : (Statistique Canada, 2023c)

⁴ Statistique Canada avertit le lecteur que la proportion correspondant à une baisse de moins de 5 % est à prendre avec prudence.

Enfin, cette enquête cherche à identifier les avantages environnementaux des innovations de produits ou de procédés mises en place. Ainsi, 77 % des entreprises minières du Québec mentionnent des avantages découlant d’une utilisation efficace des ressources. La moitié mentionne une réduction de la consommation de ressources avec du recyclage et une amélioration de l’efficacité par la réduction de la consommation d’énergie. C’est beaucoup plus que pour le secteur manufacturier québécois où cette proportion s’élève à respectivement 39 et 26 %. En Ontario, ce sont seulement 40 % des entreprises minières qui témoignent d’une réduction de la consommation des ressources au moyen du recyclage (Statistique Canada, 2023b).

Figure 14 : Innovations de produits ou de procédés avec des avantages environnementaux pour les secteurs miniers et manufacturier en 2015-2017 et 2017-2019 au Québec



Source : (Statistique Canada, 2023b)

2.5 Principales technologies de pointe et impacts de la transformation numérique dans l’industrie minière au Québec

L'analyse des données de Statistique Canada issue de l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise montre que, en 2019, le secteur minier au Québec semblait adopter moins d'innovations que le secteur manufacturier. Cette observation concorde

avec l'idée répandue d'une réticence au changement technologique dans l'industrie minière, comme soulignée par les travaux de Gruenhagen & Parker (2020) ou encore de Ediriweera & Wiewiora (2021). Cependant, il est important de noter que ces données datent de 2019 et ne reflètent peut-être pas pleinement les bouleversements technologiques récents dans l'industrie minière.

Ces dernières années des avancées significatives ont été réalisées, redéfinissant potentiellement le paysage technologique de ce secteur. En effet, l'ère du numérique a ouvert la voie à une transformation profonde et novatrice dans de nombreux secteurs industriels dont le secteur minier. Cette révolution numérique offre des perspectives prometteuses pour améliorer l'efficacité opérationnelle, la sécurité des travailleurs et la durabilité environnementale des activités d'exploitation. Il ne fait aucun doute que la transformation numérique connaît déjà et continuera d'avoir un impact sur l'industrie minière, apportant des bénéfices importants aux différents stades de la chaîne de valeur minière et peut permettre, par exemple, aux entreprises minières d'optimiser leurs processus, de réduire leurs coûts, d'améliorer la prise de décision et de renforcer leur compétitivité sur le marché mondial. Les technologies de l'information et de la communication, telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), l'automatisation, la robotique et l'analyse des données massives (Big Data), sont au cœur de cette transformation. La transformation numérique agit comme un catalyseur d'innovation.

Cependant, le potentiel complet de la transformation numérique reste à réaliser, et la capacité des innovations à contribuer de manière significative à la productivité demeure incertaine. Selon Steen et coll. (2018), l'utilisation des technologies numériques est un processus qui prend du temps et présente plusieurs défis :

- 1) les technologies numériques peuvent générer des gains de productivité importants, mais seulement si la technologie améliore la coordination de la production tout au long de la chaîne de valeur et de la chaîne d'approvisionnement ;
- 2) l'application de la technologie numérique à des points spécifiques de la chaîne de valeur aura un impact limité. La numérisation et la coordination d'un réseau d'approvisionnement intégré nécessitent de nouvelles capacités commerciales et de gestion ;
- 3) l'accumulation de données et d'expérience prendra du temps. La numérisation d'une opération minière et la création d'un nouvel écosystème industriel autour de la technologie numérique sont des projets à long terme.

La littérature scientifique et les rapports de l'industrie font état de trois grandes catégories de technologies susceptibles d'impacter le secteur minier : la transformation numérique,

l'automatisation et l'électrification. Une étude qualitative du Conseil des ressources humaines de l'industrie minière au Canada réalisée en 2019 auprès de 125 intervenants de l'industrie minière canadienne ayant une connaissance directe et pertinente du contexte de l'industrie montrait d'ailleurs que les innovations les plus fréquemment citées étaient les données et l'analyse (40 %), l'automatisation (40 %), suivies des véhicules électriques et alimentés par batterie (32 %) (Conseil RHiM, 2020).

L'annexe 1 fait état de la littérature sur les innovations technologiques récentes (2000-2023) dans l'industrie minière et synthétise les connaissances actuelles concernant les bénéfices et les coûts liés à l'adoption de ces diverses technologies. Le potentiel d'innovation dans l'industrie minière est important avec des technologies qui transforment radicalement la manière dont les ressources minérales sont extraites, transformées et gérées, tout en contribuant à une exploitation plus durable et efficiente.

**DES DONNÉES UNIQUES SUR LES PERCEPTIONS DU
SECTEUR MINIER PAR LA POPULATION DU QUÉBEC
AVEC LE BAROMÈTRE CIRANO**



2.6 Zoom sur l'acceptabilité sociale de l'industrie minière : des données uniques sur 10 ans pour le Québec grâce au Baromètre CIRANO

Le Baromètre CIRANO est un instrument unique au Québec en raison de sa capacité à traiter un large éventail de projets et de problématiques en s'appuyant sur des données et des informations riches, crédibles et diversifiées⁵. Il offre un aperçu approfondi de la manière dont les Québécois perçoivent les risques et contribue à enrichir la réflexion et à fournir des informations pertinentes pour la prise de décision stratégique. Depuis plus de 10 ans, sept enquêtes ont été réalisées (2011, 2012, 2013, 2016, 2018, 2021 et 2022)⁶. Le Baromètre CIRANO recueille les perceptions des Québécois au sujet des risques, de la confiance dans le gouvernement pour gérer un enjeu ou un projet donné, du niveau de bénéfices perçus dudit projet ou enjeu et enfin l'acceptabilité sociale de celui-ci.

L'enjeu de l'exploitation des mines a été intégré dans le Baromètre en 2013, alors que, lors des précédentes enquêtes, il s'agissait plutôt de l'enjeu spécifique de l'exploitation des mines d'amiante.

Nous présentons ici, à titre illustratif, des statistiques descriptives en lien avec l'exploitation des mines au Québec, ainsi que des analyses de données exclusives, en segmentant les réponses selon certaines données sociodémographiques, notamment la région d'habitation des répondants (voir les quatre figures suivantes). Pour information, les proportions en jaune indiquent des différences significatives avec les autres catégories de répondants. Lorsqu'une seule donnée est mise en avant, cela signifie que ce chiffre est significativement différent des deux autres. Lorsqu'il y en a plus d'un, cela signifie que ces deux chiffres présentent une différence significative deux à deux. Les résultats concernant la « population générale » englobent les réponses fournies par l'ensemble des Québécois ayant participé aux différentes enquêtes.

2.6.1 Les perceptions des Québécois envers l'exploitation des mines en 2022

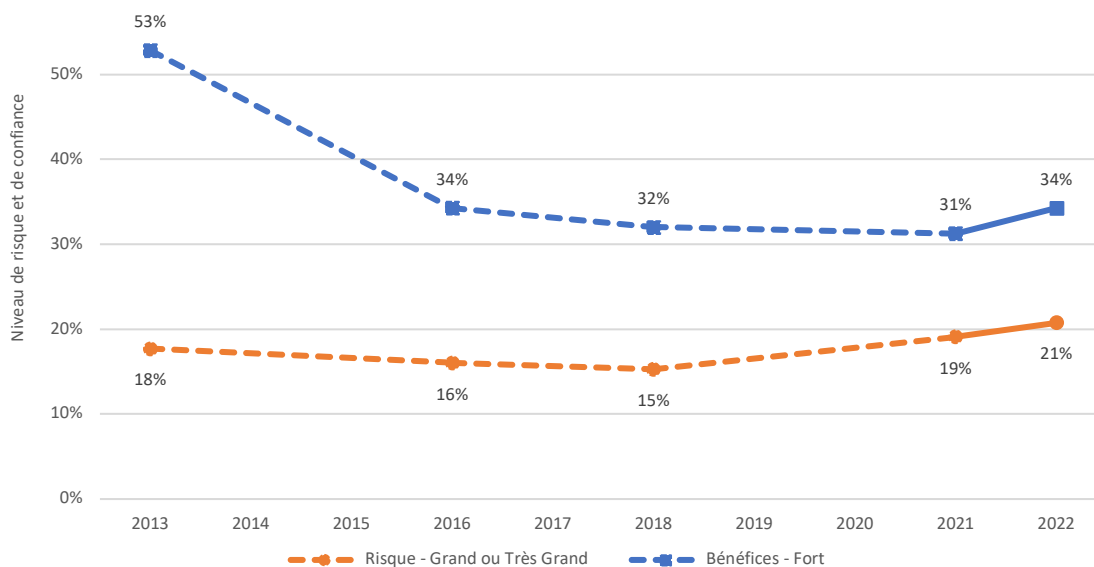
Les données du Baromètre 2022 révèlent un éventail de perceptions concernant l'exploitation minière au Québec. Environ 21 % des répondants perçoivent un risque élevé associé à cette activité. De plus, une part plus importante, soit 34 % de la population,

⁵ Un échantillon d'environ 1000 répondants représentatif de la population du Québec est utilisé pour chacune des enquêtes du Baromètre.

⁶ Tous les résultats de toutes les éditions du Baromètre sont disponibles sur le site du Baromètre CIRANO - <https://www.barometre.cirano.qc.ca>

perçoit des bénéfices élevés liés à l'exploitation minière, marquant une augmentation par rapport à l'année précédente.

Figure 15 : Évaluation des niveaux de risque et de bénéfices à propos de l'exploitation des mines au Québec entre 2013 et 2022



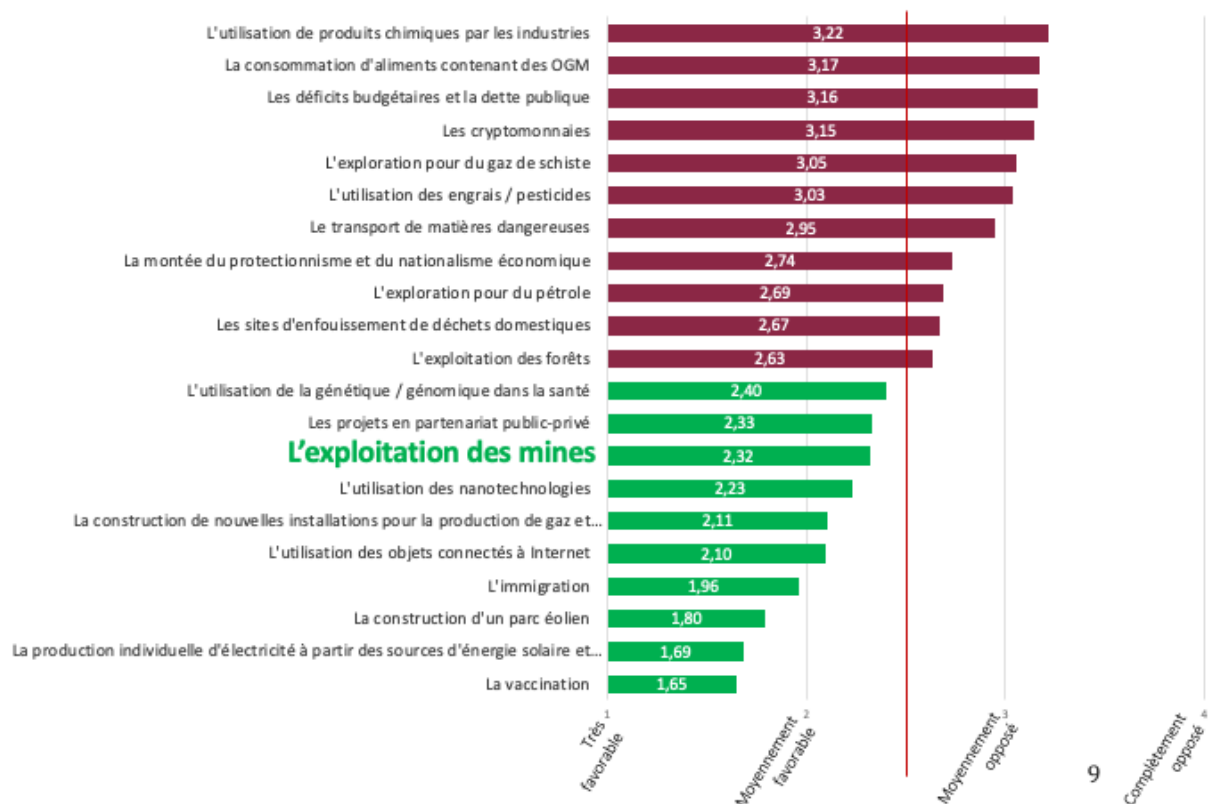
Source : Baromètre CIRANO, 2013-2022

Cependant, 13 % des répondants ne se sentent pas en mesure d'évaluer le risque lié à l'exploitation des mines, une proportion en croissance au cours des dernières années, ce qui souligne un besoin potentiel de communication et d'information plus approfondies pour aider la population à mieux comprendre les enjeux de cette industrie.

D'ailleurs, il est intéressant de visualiser comment se comparent les perceptions pour cet enjeu par rapport à d'autres enjeux du Baromètre CIRANO.

Contrairement à plusieurs autres enjeux industriels, l'exploitation des mines se situe parmi les enjeux pour lesquels les Québécois sont plutôt favorables.

Figure 16 : Perception du niveau d'acceptabilité sociale pour 21 enjeux à l'étude dans le Baromètre CIRANO 2022



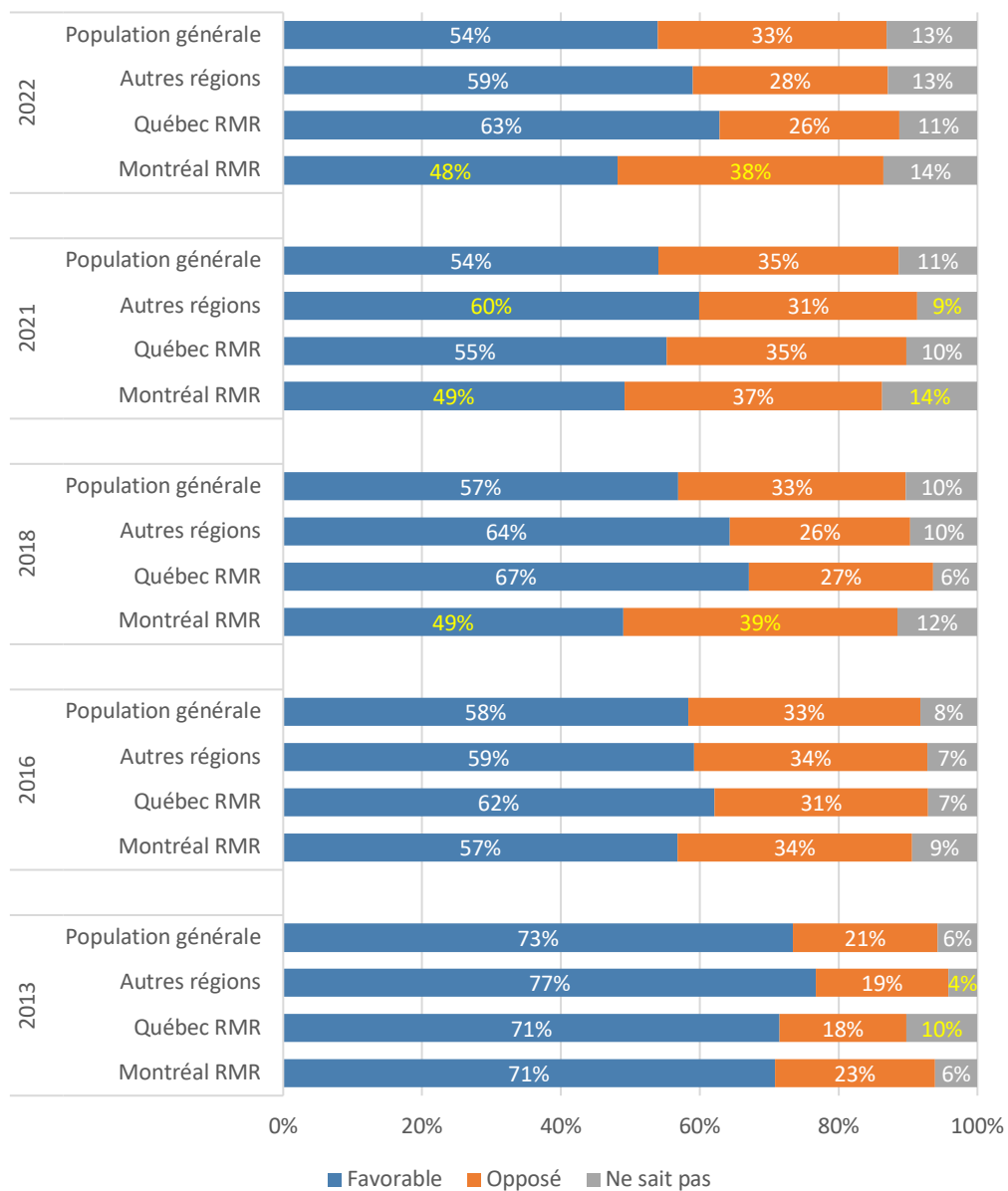
Source : Baromètre CIRANO 2022

2.6.2 Des différences de perceptions de l'exploitation des mines selon la région d'habitation et selon les années d'enquête

Dans l'ensemble, en 2022, 54 % de la population québécoise a exprimé son soutien à l'exploitation minière, marquant une stabilité relative depuis l'édition de 2016. Il est toutefois intéressant de constater que la part des répondants ne sachant pas s'ils sont opposés ou favorables à l'exploitation des mines est en augmentation au fil des éditions du Baromètre et représente en 2022, 13 % des Québécois.

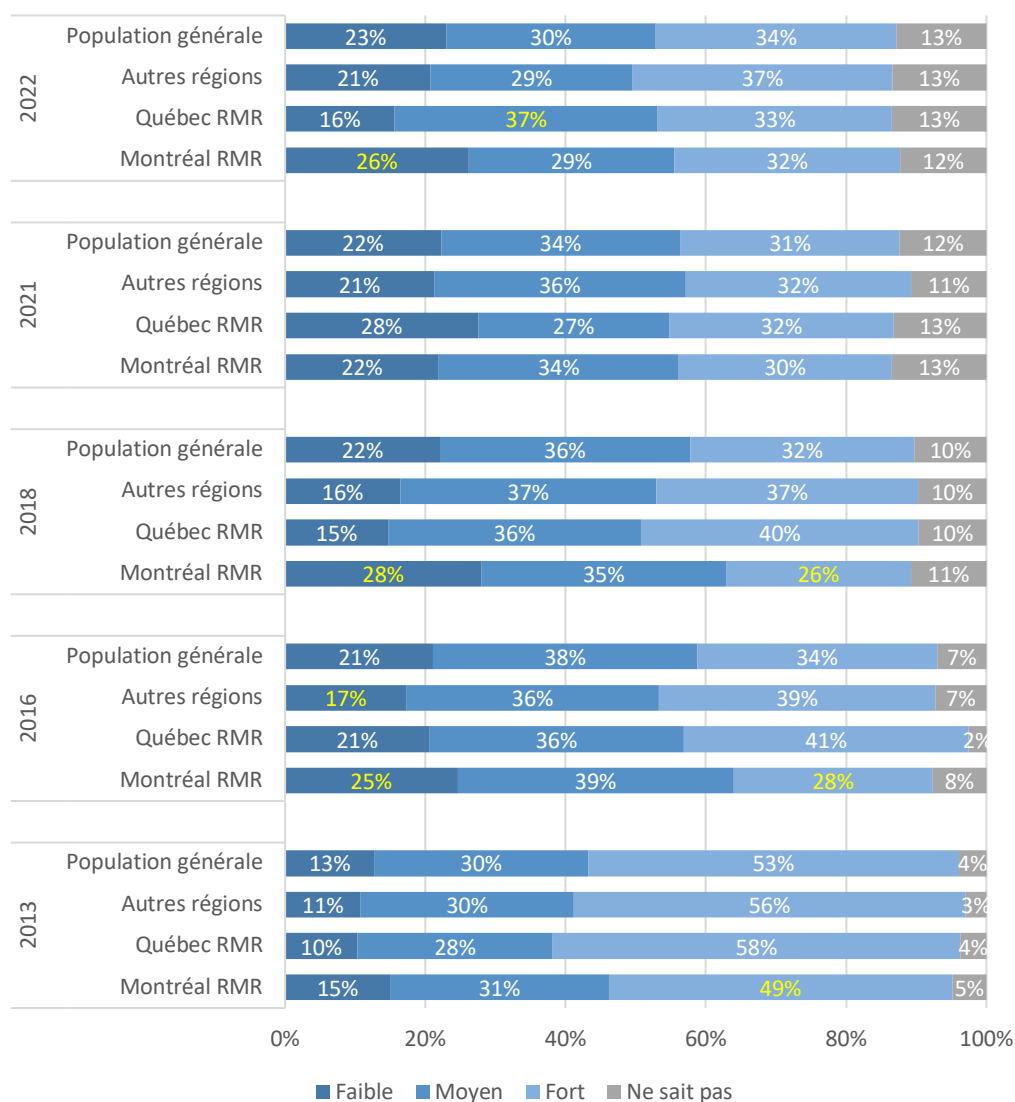
Lorsque l'on analyse les données selon la région d'habitation, on constate que les résidents de la région de Montréal demeurent, depuis 2018, les moins enclins à soutenir l'exploitation minière au Québec, avec un taux d'approbation stable d'environ 49 %. En revanche, il convient de noter que la proportion de répondants résidant dans la région de Québec RMR, favorables à l'exploitation minière, avait connu une baisse en 2021, mais a enregistré une forte remontée en 2022.

Figure 17 : Répartition des niveaux d'acceptabilité sociale selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO



Source : Baromètre CIRANO, 2013-2022

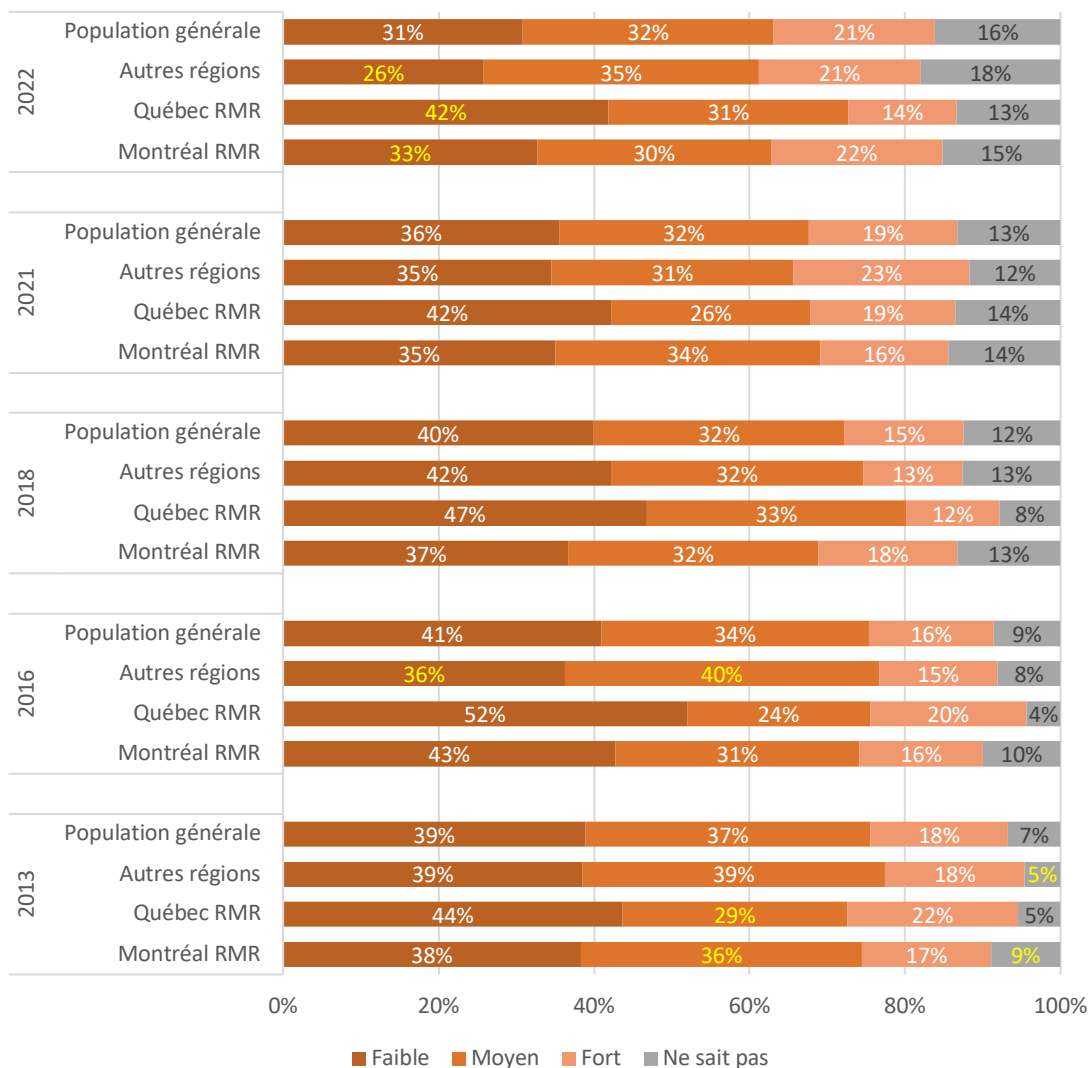
Figure 18 : Répartition des niveaux de bénéfices perçus selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO



Source : Baromètre CIRANO, 2013-2022

Globalement, en 2022, 34 % de la population considèrent que l'exploitation des mines était plutôt ou très bénéfique pour le Québec, 30 % la considéraient comme moyennement bénéfique et 13 % ne savaient pas se prononcer. Lorsque les comparaisons des données sociodémographiques sont significatives, les répondants de la région de Montréal sont toujours les plus nombreux à voir peu ou pas du tout de bénéfices à l'exploitation des mines (2016, 2018 et 2022).

Figure 19 : Répartition des niveaux de risque selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO

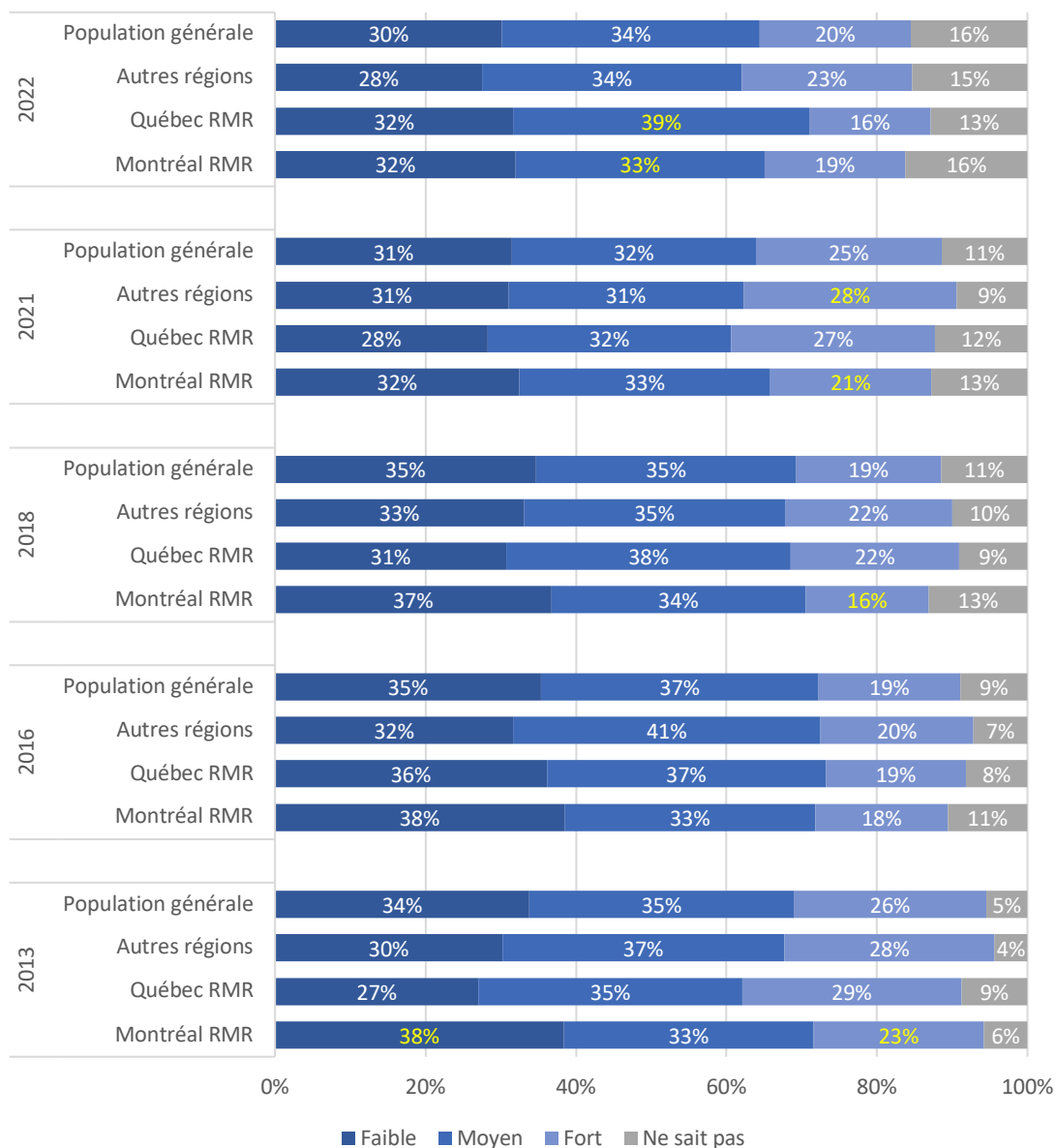


Source : Baromètre CIRANO, 2013-2022

21 % des Québécois perçoivent en 2022 des risques grands ou très grands en lien avec l'exploitation des mines, alors que 31 % perçoivent des risques négligeables ou faibles. En 2022, on note également de fortes disparités dans les perceptions de risques selon la région d'habitation. Par exemple, ce sont les habitants de Québec RMR qui sont les plus nombreux à percevoir des risques faibles, et plutôt ceux des régions autres que Montréal et Québec qui sont les moins nombreux à percevoir des risques faibles. Pour autant, la proportion de répondants qui perçoivent des risques élevés n'est pas significativement différente selon les régions. Les données de perception de risque ne permettent pas d'apporter d'autres éléments puisque les données ne sont pas forcément significatives.

Enfin, la confiance dans le gouvernement ne nous en apprend pas davantage selon cette approche puisque peu de différences sont significatives.

Figure 20 : Répartition des niveaux de confiance selon les régions d'habitation dans le Baromètre CIRANO



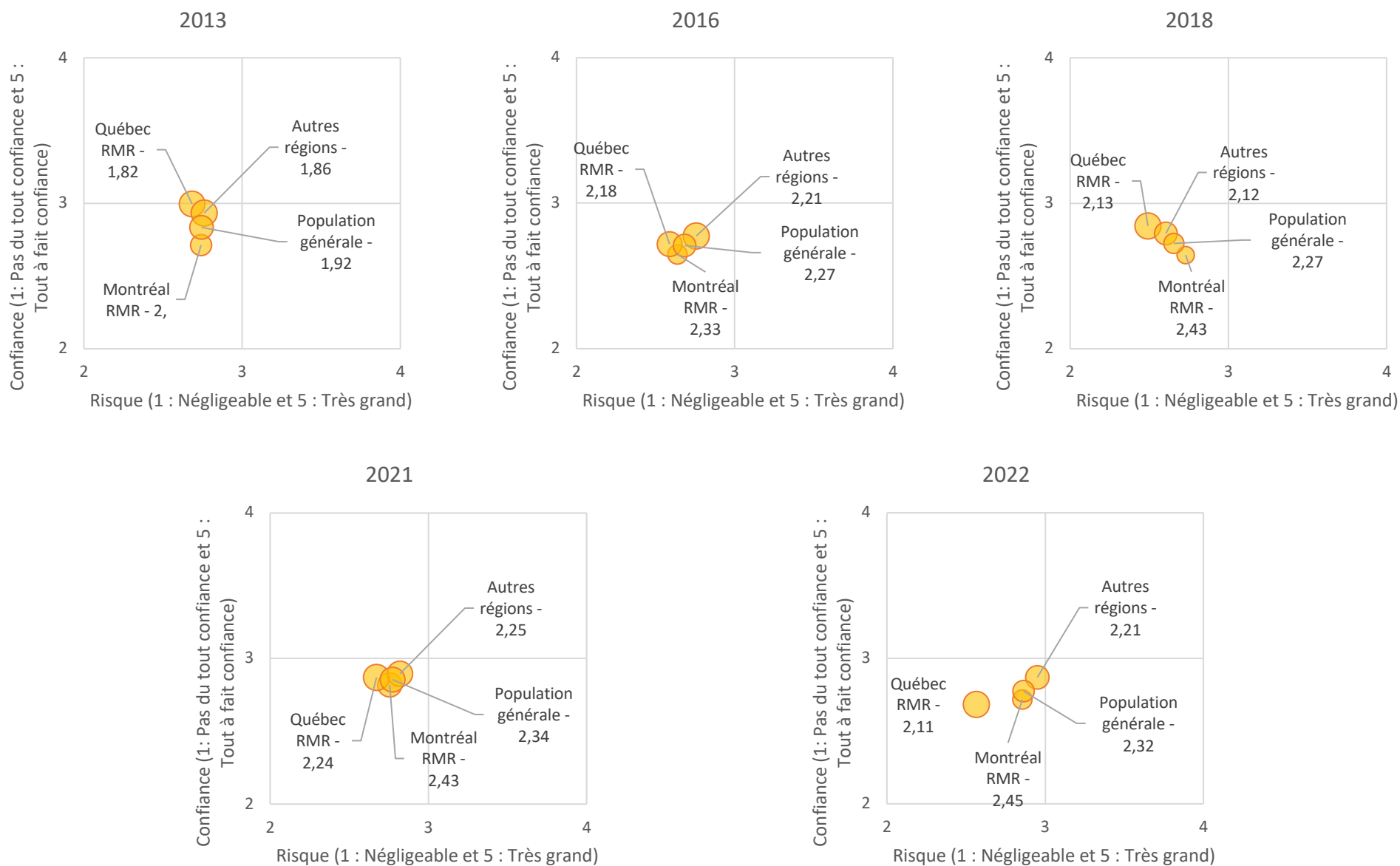
Source : Baromètre CIRANO, 2013-2022

Une approche complémentaire permet de comparer les moyennes des réponses plutôt que d'utiliser la représentation avec une échelle de Likert. Ainsi, il est possible d'analyser le niveau moyen de risque perçu par les répondants de Montréal, de Québec et des autres régions pour les cinq années. Cette même analyse est faite pour les bénéfiques,

l'acceptabilité sociale et la confiance dans le gouvernement. L'ensemble des résultats est présenté dans les graphiques suivants.

Quelques éléments qui aideront à la lecture de ces différents graphiques. D'une part, les moyennes des niveaux de risque et de confiance évoluent entre 1 (risque négligeable ou respectivement pas du tout confiance) et 5 (très grand risque ou respectivement tout à fait confiance) et il a été décidé de zoomer sur la zone entre 2 et 4 pour plus de clarté. De plus, la taille des bulles est proportionnelle au niveau de bénéfices perçus (mesurés sur une échelle de 1 à 5, 1 étant pas du tout bénéfique à 5 étant très bénéfique. Enfin, l'acceptabilité sociale est évaluée de 1 à 4 avec 1 qui correspond à très favorable et 4 très opposé. Elle est notée à côté de la région des répondants. Si ce chiffre est inférieur à 2,5, cela signifie que les répondants sont plutôt favorables. Si c'est supérieur, cela signifie qu'ils sont plutôt opposés. La bulle représentant la population dans sa globalité est également ajoutée.

Figure 21 : Affichages croisés des données sociodémographiques du Baromètre CIRANO au sujet de l'exploitation des mines



Source : Baromètre CIRANO 2013 – 2022

Au fil des années, la répartition des réponses a régulièrement évolué. Ainsi, en 2013, le niveau de perception des risques était très semblable, quelle que soit la région d'habitation. En effet toutes les bulles sont alignées verticalement. En revanche, les niveaux de confiance varient beaucoup, avec une confiance la plus basse pour les habitants de Montréal RMR.

En 2016 et 2021, les niveaux des risque et confiance étaient assez proches puisqu'on voit que les points se superposent assez bien. Notons quand même qu'en 2017, la taille de la bulle de Montréal RMR est plus petite, traduisant des niveaux de bénéfices perçus plus faibles. En 2018, c'est intéressant de voir que les bulles forment une ligne oblique. Plus la confiance augmente, plus le risque perçu diminue. La taille des bulles augmente aussi, avec un niveau de bénéfices perçus plus haut à Québec RMR que Montréal RMR.

Enfin, en 2022, on peut constater un nouveau comportement avec la bulle des répondants de Québec RMR qui semble être totalement à l'écart des autres : une perception des risques nettement plus faible, mais un niveau de confiance proche des autres régions et de Montréal RMR. Ceci s'accompagne d'une acceptabilité sociale plus forte et de bénéfices perçus plus grands qu'à Montréal.

2.6.3 Liens du Baromètre CIRANO avec le projet de recherche

Les décideurs économiques reconnaissent de plus en plus l'importance cruciale de l'acceptabilité sociale dans l'évaluation des investissements. Pour le secteur minier, la licence sociale d'opérer est d'ailleurs un préalable à toute initiative d'exploration et d'exploitation. Par exemple, lorsqu'une faible acceptabilité sociale est détectée, les entreprises peuvent être incitées à investir davantage dans des technologies visant à minimiser les impacts sur la communauté locale. Ces investissements visent à préserver la licence sociale, car ils contribuent à atténuer les préoccupations des citoyens avoisinants, renforçant ainsi la durabilité et la stabilité des projets économiques.

De plus, l'analyse coût-bénéfice est directement influencée par la perception du risque associée à un investissement donné. Une perception élevée des risques peut agir comme un frein significatif aux investissements, impactant directement les calculs de la valeur actualisée nette. Les entreprises doivent intégrer ces facteurs dans leurs stratégies d'investissement, ajustant les taux de rendement exigés en fonction de la perception du risque, ce qui peut ultimement influencer la rentabilité d'un projet.

En outre, il est crucial de souligner que la prise en compte de ces éléments va au-delà de la simple optimisation financière. Les entreprises et les investisseurs responsables intègrent également ces considérations sociales et environnementales dans leurs décisions pour favoriser une croissance durable à long terme. Cela témoigne d'une approche holistique qui prend en compte non seulement les impératifs économiques, mais aussi les répercussions sociales et environnementales, favorisant ainsi une vision équilibrée du développement économique. En somme, la compréhension approfondie de l'acceptabilité sociale et de la perception des risques élargit la perspective des décideurs et contribue à des décisions d'investissement plus éclairées et responsables.

VOLET ①

REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES
OBSTACLES ET LES INCITATIFS À
L'ADOPTION DES INNOVATIONS
DANS LE SECTEUR MINIER

3 Caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière qui influencent l'adoption d'innovations

« L'industrie minière mondiale n'a aucun problème à innover ; c'est plutôt la phase d'adoption et d'intégration des nouvelles technologies qui pose habituellement problème. » affirmaient Wasti et Casacia dans un billet Perspectives publié en 2020 (Wasti et Casacia, 2020).

Il paraît donc important de mieux comprendre comment se prennent les décisions d'innovation, et cette section se concentre sur le processus d'innovation dans l'industrie minière, en le replaçant dans un contexte économique plus vaste. Même si l'innovation résulte en fin de compte de l'action des individus au sein de l'industrie, les choix d'innovation sont façonnés par un cadre économique global, où des contraintes et des motivations influencent les décisions. Ce chapitre nous permet de mieux comprendre le contexte spécifique de l'innovation dans le secteur minier et les facteurs qui influencent son adoption grâce à l'analyse de la littérature, tout en gardant un focus économique.

Le chapitre débute en présentant brièvement les principaux défis liés à l'innovation dans l'industrie minière, puis il explore comment l'innovation se déploie dans un environnement avec des caractéristiques économiques inhérentes au secteur minier.

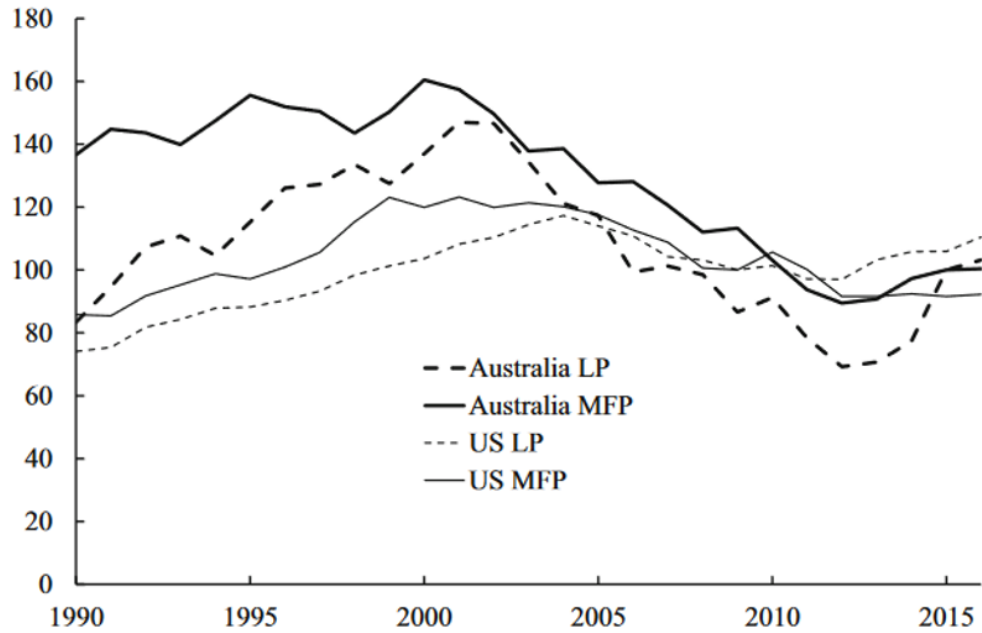
3.1 Les grands défis de l'industrie minière

L'histoire de l'industrie minière est celle d'une innovation et d'une recherche d'amélioration constante (Steen et coll., 2018). L'innovation permet de répondre aux défis structurels de productivité, d'attirer une main-d'œuvre qualifiée, mais également de répondre à des impératifs environnementaux, sociaux et de gouvernance auxquels l'industrie est soumise de manière croissante. Voyons plus en détail quels sont les grands enjeux ou défis de l'industrie minière.

3.1.1 Des enjeux de productivité

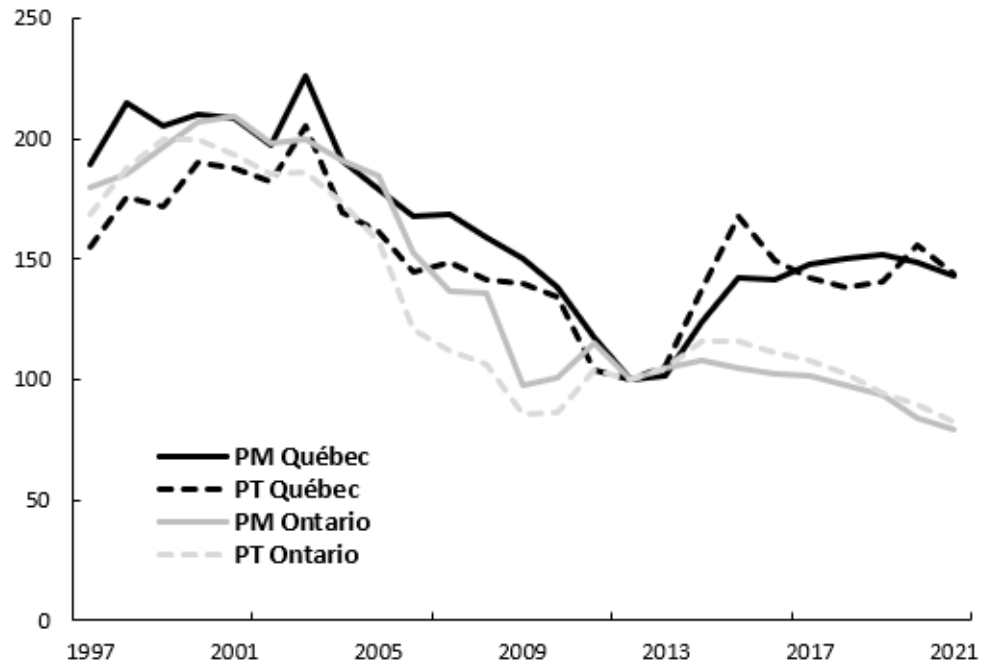
L'industrie minière doit composer avec des pressions structurelles constantes sur sa productivité. Celles-ci proviennent de la diminution, au fur et à mesure que les meilleurs sites miniers sont exploités, de la teneur en minerai des gisements. Cette diminution entraîne la nécessité de creuser de plus en plus en profondeur, d'augmenter les distances de transports de matériaux et de composer avec davantage de défis géotechniques (Ajay Lala et al., 2015; Isheyskiy & Sanchidrián, 2020).

Graphique 1 : Évolution de la productivité multifactorielle (MFP) et de la main-d'œuvre (LP) dans l'industrie minière (Indice, 2014-15=100 pour AUS, 2009=100 pour É-U)



Source: Humphreys (2020)

Graphique 2 : Évolution de la productivité multifactorielle (PM) et de la main-d'œuvre (PT) au Québec et en Ontario (indice 2012=100)



Source : Statcan-Tableau : 36-10-0211-01

Si historiquement, les acquis de la deuxième révolution industrielle ont permis aux minières des gains en productivité sous forme d'augmentation de la taille des équipements et des projets miniers, ces économies d'échelle ont désormais atteint leur point de saturation (Humphreys, 2020).

Le boom des commodités des années 2000 a permis à l'industrie d'enregistrer des profits records, mais a également mené à une chute de productivité due à l'expansion accélérée des activités minières (Steen et coll., 2018). Le Graphique 1 illustre cette baisse de la productivité dans l'industrie minière américaine et australienne depuis les années 2000 avec ce qui semble être un renversement de tendance depuis 2013.

Le

Graphique 2 indique qu'une telle réalité s'observe également au Québec et en Ontario. Le graphique indique que le renversement de la tendance baissière semble se matérialiser dans le cas du Québec, mais pas dans le cas de l'Ontario qui compose en 2021 avec un niveau de productivité (multifactorielle et main-d'œuvre) plus faible qu'en 2013.⁷

Graphique 3 : Le prix du cuivre comme indicateur de l'évolution du prix des minéraux



⁷ Il demeure néanmoins difficile d'expliquer formellement les raisons de ce revirement. Il pourrait s'agir d'une meilleure productivité pour une mine/gisement donné, d'un nouveau gisement adjacent à une mine existante qui prolonge la durée de vie tout en conservant des amortissements, d'un nouveau gisement/mine plus riche d'un minerai déjà exploité sur le territoire ou bien encore de l'exploitation d'un minerai non utilisé auparavant tel le lithium.

Le **Erreur! Source du renvoi introuvable.** illustre la nature cyclique du prix des commodités et la stabilisation du cours des minéraux à la suite du boom des commodités, propulsé par l'industrialisation rapide de la Chine au début des années 2000. Le retour à des cours stables a fait basculer la priorité des minières accordée à la production massive en faveur d'une réduction des coûts.

3.1.2 Des enjeux de main-d'œuvre

Outre la productivité, l'industrie minière est aux prises avec des enjeux en ce qui concerne la main-d'œuvre. Malgré une demande forte et une rémunération compétitive, le manque d'attrait auprès des jeunes travailleurs et les conditions de travail du secteur posent un défi important au recrutement au Canada (Conseil des ressources humaines de l'industrie minière (Conseil RHiM), 2020).

Tableau 2 : Prédiction des écarts d'embauche dans l'industrie minière canadienne par sous-secteur (2020-2030)

	Extraction et traitement	Services de support	Manufacture des métaux primaires	Exploration	Industrie minière
Variation nette de l'emploi	5,770	-1,770	-4,410	-1,010	-1,410
Sorties	42,930	11,050	16,460	10,660	81,100
Besoins totaux en main-d'œuvre	48,700	9,280	12,050	9,650	79,690
Entrées	43,900	10,940	19,910	10,910	85,650
Écarts à l'embauche	-4,800	1,660	7,860	1,260	5,960

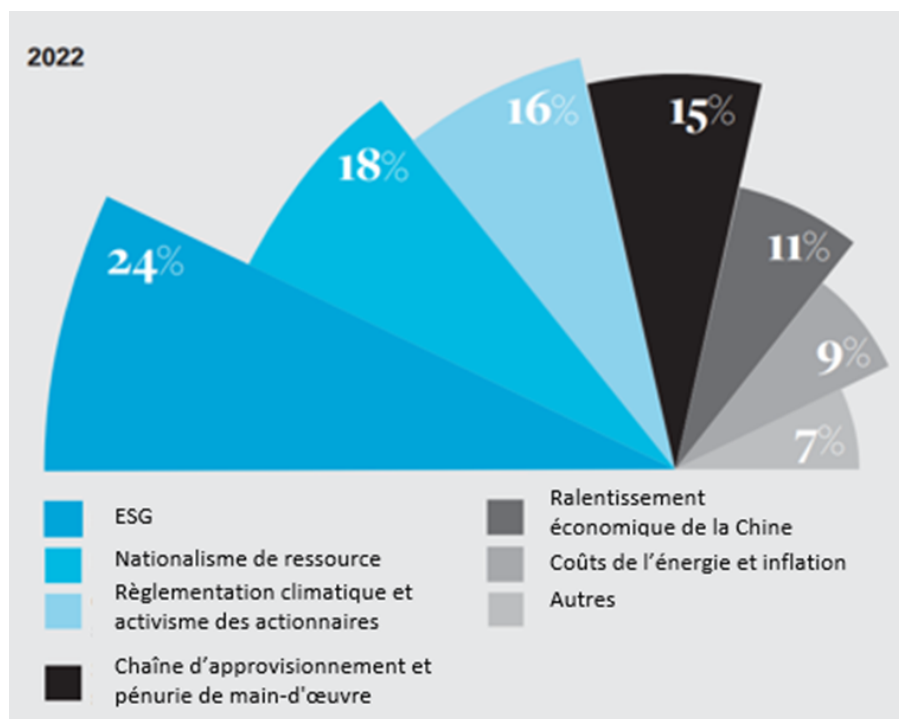
Source : Mining Industry Human Resources Council, Statistic Canada (System of National Accounts, 2016 Census, 2019)

L'innovation présente à la fois une solution potentielle, mais constitue également un défi en soi. La modernisation de l'industrie augmente l'attrait des emplois pour les nouveaux arrivants sur le marché, plus soucieux des impacts sociétaux de leur activité professionnelle. Or, cette modernisation s'accompagne de nouveaux besoins au niveau des compétences et des savoir-faire de la main-d'œuvre (Conseil des ressources humaines de l'industrie minière (Conseil RHiM), 2020).

3.1.3 Des enjeux environnementaux

Enfin, des pressions croissantes au niveau de la bonne performance environnementale, sociale et de la gouvernance (ESG) créent de nouveaux impératifs pour l'industrie. La centralité des facteurs ESG est bien comprise par l'industrie. Selon un rapport de White & Case LLP sur les risques de l'industrie minière, les facteurs ESG, la réglementation quant aux changements climatiques et l'activisme des actionnaires représentent le premier risque clé pour 40 % des entreprises sondées (White & Case LLP, 2022).

Graphique 4 : Risques principaux pour l'industrie minière (2022)



Source: White & Case 2022 Mining & Metals market sentiment survey

Les activités minières posent en effet plusieurs défis à l'environnement. L'extraction et le traitement des métaux (par exemple, le cuivre, l'or, l'aluminium, le fer, le nickel), des minéraux à combustible solide (charbon, uranium), des minéraux industriels (phosphate, gypse) et des matériaux de construction (pierre, sable et gravier) sont associés à la pollution de l'air, à la contamination de l'eau par des produits chimiques toxiques, à la perturbation du sol et à la génération de déchets. Les activités hautement consommatrices d'énergie telles que l'excavation, le broyage du minerai et le transport de matériaux par camions diesel génèrent d'importantes émissions de gaz à effet de serre.

L'impact environnemental de l'exploitation minière explique pourquoi le secteur est au centre de politiques environnementales de plus en plus strictes, en plus de devoir répondre aux attentes des détenteurs de capitaux. Outre les exigences de permis pour les nouvelles mines, qui imposent généralement une évaluation de l'impact environnemental, les entreprises minières doivent respecter des réglementations strictes en matière de gaz à effet de serre, de gestion des déchets ou de pollution de l'eau. Dans de nombreux pays, les cadres réglementaires ont de plus en plus restreint certaines pratiques de production, tant sur le plan de la sécurité au travail que des pratiques environnementales.

Ces réglementations environnementales et de sécurité servent d'incitatifs à l'innovation dans le secteur minier (Steen et coll., 2018). Nous approfondirons ces questions dans le chapitre 6 qui traite de l'intégration des facteurs ESG dans la prise de décision d'innovation dans les mines.

3.2 Caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière qui influencent l'innovation

L'industrie minière présente certaines caractéristiques économiques qui lui sont propres et qu'il est important de comprendre, car elles déterminent quand et comment l'innovation se produit en plus de façonner un écosystème d'acteurs impliqués dans le processus d'innovation. Ces caractéristiques exercent une influence certaine sur les innovations, sur la façon dont les décisions d'innovation sont prises ainsi que sur le moment où ces décisions sont prises.

3.2.1 Les gîtes miniers sont non renouvelables

Les gîtes miniers sont soumis à l'épuisement. Bien qu'il soit physiquement possible de recycler la plupart des minéraux, ceux-ci ne sont extraits qu'une seule fois. Ainsi, la qualité des ressources minérales, soit leur teneur en minerai, la taille des gisements, leur profondeur et leur facilité de traitement, se dégrade à mesure que sont exploitées les ressources les plus économiquement rentables sauf en cas de surprise géologique ou de technologie de rupture (la fracturation, par exemple). Pour demeurer compétitives, les minières doivent donc continuellement pallier l'épuisement des gisements par une amélioration de leur efficacité et une réduction de leurs coûts. Cette réalité a historiquement fait de l'industrie minière une industrie priorisant une approche d'innovation incrémentale, centrée autour des procédés et axée sur la réduction des coûts plutôt qu'une innovation technologique disruptive (Sánchez & Hartlieb, 2020a).

3.2.2 Les ressources minérales sont dispersées géographiquement

Les entreprises minières doivent composer avec des gisements miniers asymétriquement distribués. Le type de minerai, l'emplacement des gisements, leur profondeur et facilité d'accès, la présence d'infrastructures environnantes, les institutions, le degré d'acceptabilité sociale sont autant d'éléments qui déterminent l'ampleur actuelle et future de l'industrie minière d'une région donnée.

La dispersion physique signifie que les unités de travail sont institutionnalisées et cloisonnées, ce qui limite les possibilités d'une véritable collaboration et d'une cocréation commune d'une solution, limitant ainsi l'adoption de la technologie (Ediriweera & Wiewiora, 2021a). L'isolement géographique des mines a aussi été citée comme une barrière à l'innovation dans une revue systématique de la littérature réalisée par Gruenhagen & Parker (2020). L'emplacement géographique des mines dans des régions loin des centres de population et la spécificité de chaque gisement minier crée également des défis au niveau des relations entre les minières et les fournisseurs de technologies. Des fournisseurs locaux peuvent offrir des solutions adaptées, mais avec un potentiel d'intégration à plus petite échelle par rapport aux grands fournisseurs étrangers. Ces derniers ne sont toutefois pas toujours en mesure de fournir un soutien et un niveau d'adaptabilité aussi adéquat aux besoins du site.

3.2.3 Le cycle minier est intensif en capital

La construction d'une mine nécessite d'importants investissements. Des centaines de millions à plusieurs milliards de dollars sont requis, et ce, bien avant que des revenus ne soient générés. Cette structure temporelle de flux financiers est au cœur dudit « conservatisme » dont est qualifié le secteur minier par certains experts et observateurs (Daly et coll., 2022 ; Steen et coll., 2018). On note réellement la nécessité d'un retour sur investissement à court terme pour satisfaire les actionnaires. La taille et l'horizon temporel des projets d'exploitation minière limitent les minières à un choix de fournisseurs de technologies en mesure de répondre à une demande à grande échelle en plus de contribuer à l'aversion au risque dans le choix de technologies au potentiel innovant. Les méthodes d'extraction, de transport et de transformation, ainsi que les technologies associées sont généralement déterminées avant même que ne soit amorcé le développement de la mine (Daly et coll., 2022). Barnett, R. & Lopez, L. (2012) estiment que le délai d'adoption de nouvelles technologies est de 13 ans dans l'industrie minière.

3.2.4 Les étapes du processus de développement minéral sont souvent réalisées en silo et les choix technologiques sont souvent faits au moment de l'étude de faisabilité

Les étapes du processus de développement minéral (MRNF, 2020) sont souvent marquées par une fragmentation des activités, chaque étape étant réalisée de manière relativement indépendante les unes des autres. Cette approche en silo peut conduire à des défis majeurs, notamment en ce qui concerne les choix technologiques.

L'étape de faisabilité est cruciale dans le développement minéral, car elle vise à démontrer la viabilité économique du projet. À ce stade, l'accent est mis sur la rationalité

économique, la réduction des incertitudes et la démonstration de la rentabilité du projet. C'est un moment où la prudence est de mise. Les décideurs cherchent avant tout à minimiser les risques et à garantir que le projet sera économiquement viable. Or, cette approche comporte des inconvénients, puisque le fait de faire les choix technologiques à cette étape de faisabilité limite alors et par la suite la marge de manœuvre pour l'innovation (Steen et coll., 2018). Les entreprises minières peuvent se sentir contraintes de suivre des approches conventionnelles et éprouvées, car l'introduction de technologies non prouvées pourrait ajouter un niveau d'incertitude inacceptable dans la démonstration de la viabilité économique du projet.

Ainsi, avec des coûts d'investissement généralement élevés (Costa Lima & Suslick, 2006), et le fait que certaines technologies doivent être mises en œuvre dès les premières étapes de la création d'une nouvelle exploitation minière, la mise en œuvre de l'innovation et des nouvelles technologies dans le secteur minier peut être plus difficile que dans d'autres industries (Gruenhagen & Parker, 2020).

3.2.5 Les minières sont dépendantes des prix sur les marchés mondiaux

Les entreprises minières vendent leurs produits sur un marché mondial sur lequel elles n'ont que peu ou pas d'influence. Les prix tendent à être volatils, reflétant à la fois la sensibilité de la demande de minéraux à la conjoncture économique mondiale et le délai d'adaptation de l'offre à la demande inhérent au long cycle de développement et d'exploitation miniers (Ediriweera & Wiewiora, 2021a). L'extraction minière est considérée comme une industrie particulièrement cyclique (Mehrzaad Salem, 2007 ; MRNF, 2014). Les entreprises minières, confrontées à cette volatilité, privilégient souvent la réduction des coûts plutôt que l'innovation de produits. Cette préférence découle des changements cycliques qui entravent le comportement des entreprises minières en matière de prise de risque, et les incitent à ne pas prendre de risques et à se concentrer sur la réalisation des objectifs opérationnels quotidiens. En période de creux, les entreprises minières limitent leurs investissements dans les technologies afin de réduire les coûts, tandis qu'en période de pointe, même s'il existe des ressources pour l'innovation, les entreprises minières sont plus attentives à répondre aux demandes ponctuelles en augmentant la production volumétrique (Ediriweera & Wiewiora, 2021a).

3.2.6 Le cycle d'exploitation minière a des impacts locaux importants sur l'environnement et les communautés

L'exploitation minière peut être un vecteur important du développement économique local et régional. Celle-ci implique la mise en place d'infrastructures, stimule la création d'entreprises locales et de prestataires de services pour la mine sans compter les emplois directs. Un projet minier peut également être socialement et environnementalement perturbateur. L'exploitation minière implique l'excavation de milliards de tonnes de matériau et génère des quantités importantes de déchets solides et liquides. Les attentes du public et des gouvernements contribuent à la pression sur les entreprises minières pour répondre à ces enjeux sociaux et environnementaux. De plus, la génération de déchets provenant de l'exploitation minière augmente plus rapidement que la croissance de la production minière, car la qualité des ressources extraites se détériore (Daly et coll., 2022). Cela exercera des pressions supplémentaires sur l'industrie pour développer des moyens innovants de faire face aux conséquences environnementales de l'exploitation minière ainsi que pour travailler plus étroitement avec les communautés affectées.

4 Un contexte organisationnel de l'industrie minière qui influence l'adoption d'innovations

Les caractéristiques économiques définissent en partie les contraintes avec lesquelles doit composer l'écosystème minier. Nous verrons dans ce chapitre que les relations stratégiques, les partenariats, la coopération et l'évolution des rapports de force au sein de l'écosystème permettent de comprendre d'où provient l'innovation, mais également les enjeux et les opportunités qui émergent d'une coopération stratégique et d'une communication entre les parties prenantes. N'en demeure pas moins que la matérialisation de l'innovation dans la mine est une décision qui revient à la minière. Sur le plan organisationnel, la littérature identifie plusieurs incitatifs et barrières au processus d'innovation. Bien qu'important en soi, les facteurs organisationnels demeurent intrinsèquement liés au contexte économique et à l'écosystème de l'innovation et doivent en ce sens être considérés dans leur globalité.

Dans cette section portant sur le contexte organisationnel, notre analyse sera principalement basée sur l'étude réalisée par Ediriweera & Wiewiora (2021). Cette étude aborde précisément la même problématique que notre propre recherche et suit une méthodologie similaire. Les auteurs ont entrepris une revue de la littérature pour identifier les facteurs susceptibles d'influencer l'adoption de technologies dans le secteur minier, et ils ont complété cette revue en réalisant des entretiens avec des parties prenantes de l'industrie minière en Australie (Ediriweera & Wiewiora, 2021b).

Nous sommes pleinement conscients que les éléments que nous allons présenter ont une portée qui peut être limitée dans certains cas du fait qu'ils se rapportent surtout aux facteurs spécifiques à l'industrie minière en Australie. Cependant, il est important de noter que bon nombre de ces facteurs sont applicables au secteur minier québécois. Les entretiens que nous avons menés avec les acteurs de l'industrie minière au Québec, dont les points saillants sont rapportés dans le volet 2, contribueront d'ailleurs à corroborer ou à infirmer ces éléments.

4.1 L'incertitude et les risques liés aux technologies émergentes non éprouvées dissuadent les investissements

Les projets miniers impliquent d'importants investissements initiaux souvent dans un contexte d'incertitude géologique, de réglementations environnementales et d'une volatilité des prix des matières premières. Bien que le risque soit présent, celui-ci est évalué, modélisé et paramétré à différents stades du cycle minier. Pourtant, l'ensemble de

ces facteurs rendent les acteurs de l'industrie prudents quant à la prise de risques supplémentaires.

Le risque lié à l'adoption de nouvelles technologies est ainsi considéré comme élevé dans l'industrie minière. Cela est particulièrement le cas pour les technologies qui n'ont pas encore été éprouvées (Ediriweera & Wiewiora, 2021). Étant donné que les résultats de l'adoption de technologies ne peuvent pas être prédits avec précision, les employés sur site minier hésitent à accepter ces nouvelles technologies, car elles pourraient avoir des impacts négatifs sur leur performance et leur rémunération par conséquent. En effet, la perception du risque est un important obstacle à l'adoption des technologies (Johnson, 2010), car les organisations qui ont une aversion pour le risque ont tendance à être plus réticentes à adopter de nouvelles technologies en raison de la variance des résultats.

Le coût perçu par rapport aux avantages de l'adoption de la technologie et l'incapacité à voir des résultats immédiats de ces technologies sont les raisons pour lesquelles ces technologies sont considérées comme présentant un risque élevé. Steen & coll. (2018) mentionnent que cette logique à court terme provient du fait que les minières ont un budget restreint pour le risque et que celui-ci est surtout alloué à l'exploration et au développement. Par conséquent, les impératifs de sécurité et de stabilité financière ont souvent tendance à primer sur l'adoption de l'innovation et des nouvelles technologies (Rehan Wasti & Lucy Casacia, 2020).

Les personnes qui ont été interrogées en Australie dans le cadre de l'étude de Ediriweera & Wiewiora (2021) ont signalé que les opérations minières sont fortement intégrées et axées sur la réalisation des objectifs de production immédiats. Les bénéfices des nouvelles technologies sont souvent réalisés dans un avenir plus lointain. Les perturbations des opérations quotidiennes liées à l'adoption de la nouvelle technologie limitent la réalisation des objectifs à court terme qui sont liés aux indicateurs de performance des employés miniers. On note alors un décalage ici entre les objectifs du management stratégique et ceux du management opérationnel, ce dernier se basant sur des indicateurs de performance généralement de court-terme, sur l'augmentation de la productivité et la diminution des délais de production.

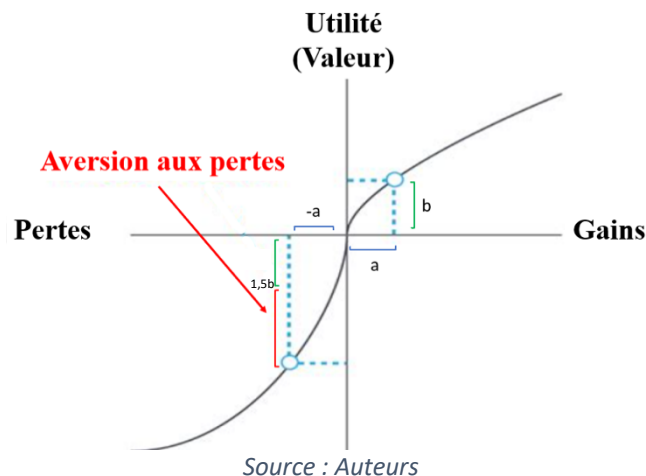
4.2 Les compagnies minières sont généralement plus averses aux pertes

Lorsqu'une mine fonctionne de manière rentable avec sa technologie existante, l'incitation au changement technologique peut être relativement faible par rapport aux perturbations qu'il peut entraîner dans les opérations. Le risque pour la sécurité était une autre préoccupation majeure dans l'industrie minière, car personne ne souhaite

expérimenter ou mettre en œuvre quelque chose qui pourrait compromettre la sécurité des employés.

Ces considérations sont surtout expliquées par un niveau d'aversion aux pertes, concept qui semble être encore plus prépondérant dans l'industrie minière, particulièrement au niveau opérationnel. Ce concept est lié au biais psychologique selon lequel les individus préfèrent éviter des pertes plutôt que d'acquérir des gains équivalents. L'aversion aux pertes diffère de l'aversion au risque en ce qu'elle surpondère la valeur et/ou la probabilité qu'une perte survienne par rapport à un gain ou une probabilité de gain équivalente. Cette aversion aux pertes peut mener à des comportements incorrects au sens de la théorie économique.

Graphique 5 : Les compagnies minières averses aux pertes surestiment l'importance et potentiellement la probabilité d'occurrence d'une perte (-a) par rapport au gain équivalent (a)



Le graphique ci-dessus illustre en quoi un gain (+a) procure moins d'utilité qu'une perte équivalente (-a). La courbure de la fonction dans le cadran des pertes est plus importante. Dans l'industrie, ce phénomène se manifeste, entre autres, par une réticence aux approches innovantes et, plus spécifiquement, aux innovations disruptives dans le but de prévenir des pertes potentielles. Les gestionnaires dans les mines peuvent manifester une aversion aux pertes en raison de la crainte de commettre une erreur coûteuse ou du désir de maintenir le statu quo. La nature à long terme des projets miniers et les importants investissements initiaux peuvent intensifier cette aversion aux pertes potentielles.

4.3 Les projets pilotes sont importants pour réduire l'incertitude associée aux technologies innovantes

L'implantation de projets pilotes s'avère une avenue efficace comme canal d'apprentissage et de communication verticale entre les unités de l'entreprise ainsi que comme moyen de mitigation des risques associés aux technologies disruptives. De telles expérimentations répondent aux impératifs d'une industrie intensive en capitale où des changements mineurs peuvent ralentir les opérations et entraîner des répercussions importantes sur les coûts et les tonnes produites. Samis & Steen (2020) démontrent qu'un projet pilote peut créer de la valeur, que le risque technique associé à l'implémentation soit élevé ou faible. Les auteurs ajoutent que, pour les innovations technologiques avec probabilité élevée d'échec, les projets pilotes sont la seule avenue à la création de valeur (Samis & Steen, 2020).

Stewart et Malatji (2018) estiment que les projets pilotes réussis contribuent à rendre les avantages d'une innovation visibles et concrets, ce qui peut avoir un impact positif sur sa diffusion. En effet, selon eux, des visites sur site et des interactions informelles entre pairs permettent de communiquer des informations clés aux futurs adoptants potentiels. De cette manière, le processus de démonstration ou de projets pilotes contribue à diffuser et à renforcer la crédibilité de la pratique exemplaire et du processus d'adoption et joue le rôle de preuve de concept pour l'ensemble de l'industrie.

En plus de réduire l'incertitude associée aux nouvelles technologies, les projets pilotes permettent le développement d'une nouvelle culture organisationnelle davantage axée sur l'apprentissage et les initiatives.

4.4 La culture d'apprentissage et le partage de savoir interdisciplinaire sont importants pour mitiger l'aversion aux pertes

Une culture qui valorise l'expérimentation et l'apprentissage par échec permet, à long terme, de mitiger l'aversion aux pertes dans l'industrie minière et de favoriser les projets innovants (Ediriweera & Wiewiora, 2021). Une autre étude, non exclusive au secteur minier, montre que la culture organisationnelle, dotée de communication et de leadership est essentielle pour créer une propension culturelle à la diffusion de la technologie (Caiazza & Volpe, 2017).

Un transfert de connaissances entre les différentes unités organisationnelles permettrait une transparence accrue du processus d'innovation de nouvelles technologies tout en créant un espace de partage d'information stimulant l'efficacité à l'adoption et à l'intégration (Ediriweera & Wiewiora, 2021).

4.5 La communication et la collaboration aux différents niveaux de l'organisation sont importantes pour favoriser une culture d'innovation

Les personnes interrogées en Australie dans le cadre de l'étude de Ediriweera & Wiewiora (2021) ont révélé que les employés, en particulier ceux travaillant dans les opérations minières, ont une marge de manœuvre et une autonomie décisionnelle limitées dans leur travail quotidien. Les données ont montré que la structure en silo, typique des entreprises minières, restreint la participation d'experts dans la prise de décisions liées à l'adoption et à la mise en œuvre de nouvelles technologies.

En général, les entreprises minières ont des structures hiérarchiques centralisées avec une chaîne de commandement clairement définie et relativement longue. Ce type de structure peut avoir des effets néfastes sur l'adoption d'innovation. D'une part, elle peut limiter la participation des employés à la prise de décisions, car de nombreuses décisions liées au changement et à l'adoption de technologies sont prises au niveau supérieur, dans les sièges sociaux, tandis que la mise en œuvre des technologies se déroule sur les sites miniers. Les employés qui prennent des décisions pour mettre en œuvre la technologie ont généralement un pouvoir limité ou un contrôle limité du processus de mise en œuvre, tandis que les employés chargés de mettre en œuvre de nouvelles technologies ont une autorité de décision limitée ou des informations limitées sur l'évaluation initiale et la décision concernant la mise en œuvre. Ce manque de participation tout au long du processus d'adoption conduit à un accès fragmenté à l'information freinant l'innovation. D'autre part, cette structure organisationnelle peut également poser des défis à l'établissement de relations de confiance entre la direction et les employés, ainsi qu'entre les employés sur le site minier et les employés du siège social (Javanmardi Kashan et coll., 2021 ; Steen et al., 2018). La dispersion géographique constitue également un obstacle à l'établissement de relations de confiance entre le siège social et les sites miniers, car ces derniers sont situés dans des zones très éloignées avec peu d'opportunités d'interaction entre le site et le siège social. L'analyse de Steen & coll. (2018) a révélé que le manque de confiance est la principale raison de la collaboration limitée entre les unités de travail, ce qui a un impact sur les résultats de l'adoption de la technologie.

Ediriweera & Wiewiora (2021) mentionnent l'importance de valoriser les employés et le savoir-faire opérationnel dans le processus décisionnel d'adoption de technologies afin de stimuler l'innovation des minières. Davantage d'autonomies et de responsabilités mènent à une prise en charge des employés au niveau de la résolution de problème au jour le jour. La valorisation des employés peut se faire selon trois mécanismes : déléguer des responsabilités décisionnelles, accorder de la flexibilité et fournir aux employés des

opportunités de supervision du processus d'innovation. Steen & coll. (2018) mentionnent que lorsqu'une nouvelle technologie est introduite dans la mine, celle-ci intègre un système social, technique et organisationnel profondément interdépendant. La mise en valeur du savoir-faire opérationnel et l'autonomisation des travailleurs dans la mine permettent une transition plus fluide quant à l'intégration de nouvelles technologies puisque les équipes opérationnelles sont déjà impliquées à un certain degré dans le processus innovatif.

4.6 Les systèmes de performance et de reconnaissance sont axés sur l'efficacité et l'efficience au détriment de la créativité et de l'apprentissage

L'industrie minière accorde peu d'importance à la créativité et à l'apprentissage, car l'accent est davantage mis sur l'efficacité et l'efficience. Cela a un impact sur les décisions concernant l'adoption de la technologie dans l'industrie minière. Les entrevues menées par Ediriweera & Wiewiora (2021) ont démontré que de nombreuses entreprises minières ont tendance à privilégier l'efficacité plutôt que l'innovation. Cette orientation vers l'efficacité entrave les capacités créatives des employés, ce qui se traduit par un manque d'attention à l'adoption de nouvelles technologies.

Les entretiens ont également révélé que les employés sont créatifs pour trouver des solutions aux problèmes quotidiens, mais ils ne sont pas enthousiastes à l'idée d'investir du temps pour créer et proposer des changements disruptifs. Les indicateurs clés de performance (KPI) dans l'industrie minière, en particulier sur les sites miniers, sont basés sur la production volumétrique et l'efficacité. Bien que les participants aient noté que les entreprises minières ont tendance à reconnaître les employés pour de petites améliorations incrémentielles des processus ou systèmes existants, les idées disruptives, considérées comme plus risquées et non prouvées, sont rarement reconnues ou récompensées. Par conséquent, le manque de reconnaissance des contributions des employés à l'innovation entrave considérablement les possibilités d'adoption de la technologie dans l'industrie minière, car les résultats de l'innovation ne sont pas alignés sur les KPI existants.

En outre, les participants aux entrevues dans le cadre de l'étude de Ediriweera & Wiewiora (2021) ont reconnu que les KPI sont compartimentés et se concentrent généralement sur la contribution de chaque unité à la production volumétrique. En conséquence, les unités de travail se concentrent sur l'atteinte de leurs propres objectifs de performance individualisés, plutôt que de référer à la performance améliorée, toutes sources combinées. Un des exemples de cette dynamique en silo se situe au niveau de l'usine de

traitement, soit de la composante usuellement la plus intensive en énergie du cycle d'exploitation minière. Dans la structure actuelle des KPI, les KPI de l'unité de traitement et de l'unité de dynamitage sont compartimentés. L'unité de dynamitage se concentre sur le dynamitage à faible coût pour atteindre les KPI, ce qui pourrait entraîner le passage de grosses roches à travers l'usine de traitement. Cela entraîne à son tour une consommation d'énergie et une maintenance considérable, ce qui affecte négativement les KPI de l'usine de traitement. Un système de KPI intégré pourrait offrir une vue plus holistique de l'ensemble du processus minier, en se concentrant sur l'efficacité et l'efficacité de l'ensemble du processus plutôt que sur des unités de travail spécifiques.

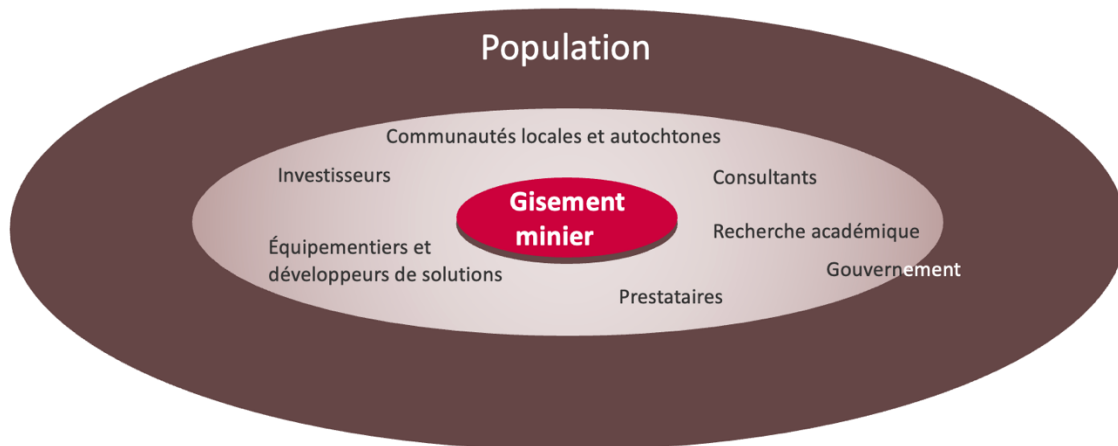
Une des solutions au système de récompense (KPI) axé sur les tonnes extraites limitant la participation des employés de sociétés minières au processus d'innovation est une approche qui intègre l'innovation et la résolution de problèmes au système de récompense. Les entrevues auprès de parties prenantes de l'industrie minière en Australie indiquent qu'on reconnaît qu'une restructuration du système actuel de KPI afin de mutualiser une partie des incitatifs au niveau de l'ensemble de la production plutôt qu'au niveau individuel, en plus d'une contribution visant à récompenser les idées novatrices, permettrait de stimuler l'innovation (Ediriweera & Wiewiora, 2021a ; Steen et al., 2018).

5 Un écosystème spécifique à l'industrie minière qui influence l'adoption d'innovations

Bien que l'on considère et mesure généralement l'innovation du point de vue des minières, le processus par lequel l'innovation se matérialise est influencé par un nombre important d'acteurs de l'industrie.

En effet, il est important de comprendre qu'un gisement minier évolue dans un écosystème intégrant de nombreux acteurs : que l'on pense aux investisseurs, jusqu'aux équipementiers en passant par les communautés locales et autochtones. L'ensemble de cet écosystème est important à prendre en considération tout au long de notre étude.

Figure 22 : Parties prenantes d'un gisement minier



Source : Auteurs

Les minières, les équipementiers et fournisseurs de technologie (en anglais *Mining Equipment & Technology suppliers*, d'où l'acronyme METS), les centres de recherche et les universités, puis les gouvernements sont tous impliqués à divers degrés dans le processus d'innovation. Que ce soit dans la mise au point de nouvelles technologies ou de procédés directement destinés au site minier ou bien par la mise en place de réglementation ou de politiques publiques ciblées, entreprises, gouvernements et société civile sont en interactions constantes. Comprendre ces interactions aujourd'hui et dans les dernières années permet d'identifier les leviers et les contraintes au niveau de l'innovation. Une part substantielle de l'innovation issue de l'écosystème se fait à travers des transferts de connaissances et de technologies au sein et entre les différentes entités de cet écosystème (Beatriz Calzada Olvera, & Michiko Iizuka, 2020 ; Daly et al., 2023).

Nous allons étudier certains acteurs de cet écosystème et tenter d'identifier comment ils influencent l'adoption d'innovations par le secteur minier.

5.1 L'influence des gouvernements dans l'adoption d'innovations

L'influence des gouvernements dans l'adoption d'innovations dans l'industrie minière est importante et peut se manifester à différents niveaux : à travers la réglementation, les incitations financières, la recherche et le développement, ainsi que la formation de la main-d'œuvre (Gruenhagen & Parker, 2020).

Les gouvernements jouent un rôle essentiel en établissant des réglementations et des normes environnementales pour l'industrie minière. Les réglementations liées à la gestion des déchets, à la réhabilitation des sites miniers et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre peuvent influencer les choix technologiques des entreprises. Les nouveaux cadres ESG seront abordés ultérieurement.

Certains gouvernements proposent des incitations financières, telles que des crédits d'impôt pour la recherche et le développement, des subventions ou des avantages fiscaux, pour encourager l'innovation dans l'industrie minière. Ces incitations peuvent contribuer à attirer des investissements dans des technologies innovantes. Par exemple, au Québec, plusieurs programmes de soutien et stratégies gouvernementales, principalement portées par le MRNF, sont dédiés au soutien à la R&D dans le secteur minier, tels que le Programme d'appui à la recherche et à l'innovation du domaine minier, le Programme de soutien au développement durable pour les entreprises du secteur minier et, plus récemment, la création d'un réseau de recherche scientifique dédié aux minéraux critiques et stratégiques.

Les programmes du MRNF se concentrent sur la recherche et le développement, notamment en lien avec les techniques d'exploration, les procédés d'extraction, les procédés de concentration, de transformation et de recyclage. Des études géométallurgiques et géoenvironnementales en laboratoire sont, par exemple, financées pour déterminer les procédés les plus rentables pour l'exploitation minière. Le Programme d'appui à la recherche et à l'innovation du domaine minier (PARIDM)⁸, destiné aux mines

⁸ Voir : <https://mrnf.gouv.qc.ca/mines/programmes/programme-dappui-a-recherche-a-linnovation-domaine-minier/>

existantes qui souhaitent améliorer leurs procédés, est un exemple de ces programmes de soutien à la R&D.

Le MRNF a aussi mis en place un Programme de soutien au développement durable pour les entreprises du secteur minier⁹, initiative de certification assortie d'aides financières pour inciter les sociétés minières à améliorer leurs pratiques sur le plan environnemental. Parallèlement à ces programmes, figurent également des mesures de crédits d'impôt pour l'exploration minière.

Le ministère soutient des projets d'innovation qui visent à réduire les coûts, réduire la consommation en énergie, et accroître la productivité. Si auparavant l'accent était principalement mis sur l'exploration dans le processus de développement minéral jusqu'à la mise en valeur, l'accompagnement concerne maintenant aussi des projets de mise à l'échelle, induisant une implication plus importante dans les processus de développement minier de la part du ministère.

Ces programmes d'aide financière s'adressent principalement aux sociétés d'exploitation minière, les entreprises d'exploration et les OBNL impliqués dans la recherche et le développement. Les équipementiers bénéficient également indirectement de ces subventions.

Un réseau de recherche scientifique dédié aux minéraux critiques et stratégiques a aussi été créé par le ministère, avec un programme de soutien supplémentaire.

Les gouvernements peuvent jouer également un rôle dans la formation et le développement de la main-d'œuvre qualifiée pour l'industrie minière. Ils peuvent établir des partenariats avec des établissements d'enseignement pour offrir des programmes de formation adaptés aux besoins de l'industrie. Une main-d'œuvre qualifiée est essentielle pour l'adoption de technologies de pointe (Conseil des ressources humaines de l'industrie minière (Conseil RHIM), 2020).

⁹ Voir : <https://mrnf.gouv.qc.ca/mines/programmes/soutien-developpement-durable-entreprises-secteur-minier/>

5.2 L'influence des équipementiers dans l'adoption d'innovations

5.2.1 Un changement de paradigme dans la structure de l'innovation minière durant les dernières décennies : une désintégration verticale des grandes entreprises minières et un nouvel écosystème d'innovation alimenté principalement par les METS

Historiquement, les entreprises minières innovantes étaient dotées d'une taille importante et d'un haut degré d'intégration verticale, produisant une proportion relativement élevée de leur innovation de processus¹⁰. Or, depuis les années 80-90, on assiste à l'émergence d'un acteur de plus en plus important dans l'écosystème d'innovation minière, soit les *METS*.

Les *METS* regroupent un ensemble d'entreprises avec des ancrages plus ou moins directs avec l'industrie minière. Caterpillar, multinationale américaine et chef de file manufacturière dans l'industrie minière développe, par exemple, une panoplie d'équipements destinée à l'industrie de la construction, de l'agriculture, des énergies fossiles, etc. General Electric (GE), conglomérat connu pour son bras énergétique (centrales, turbines à gaz, génératrices, éoliennes, équipements hydroélectriques et autres), est de plus en plus actif dans le secteur minier au niveau de l'énergie, mais également en fournissant des solutions digitales et des technologies numériques. D'autres entreprises issues de l'ingénierie, des technologies de l'information, de la consultation et des services financiers se greffent à cet ensemble de fournisseurs en grande partie responsables de l'innovation dans l'industrie.

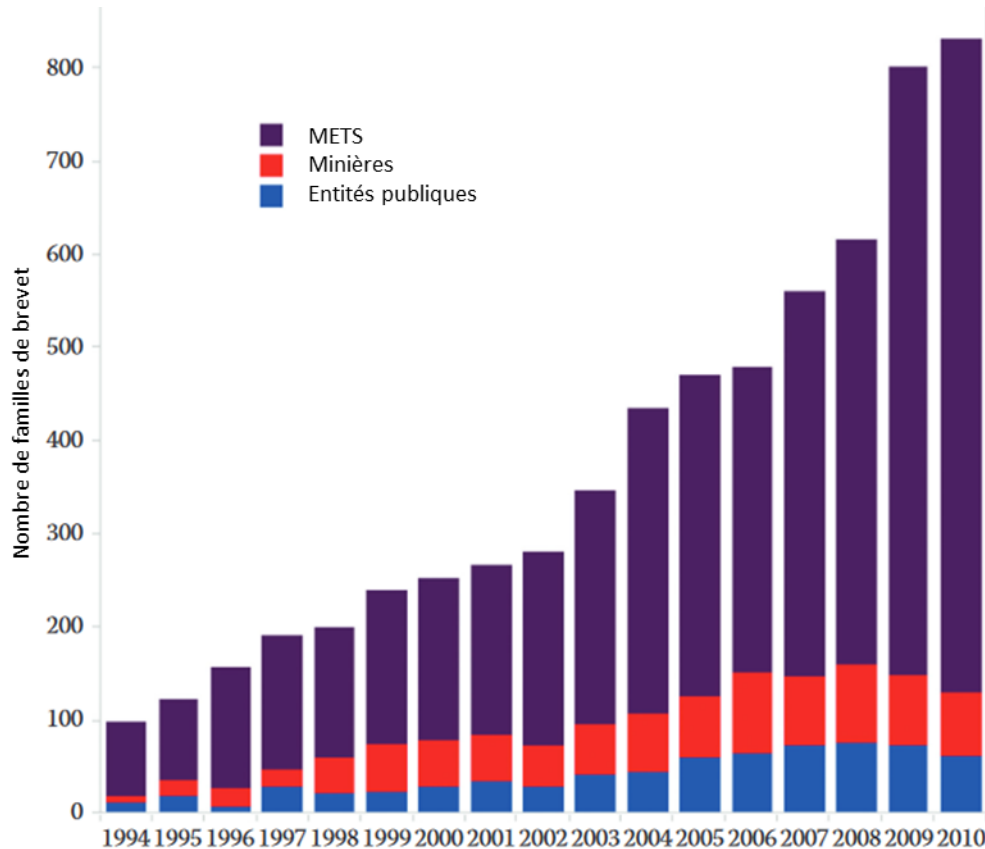
Ainsi, l'externalisation du développement technologique aux *METS* est désormais un nouveau paradigme avec des implications considérables pour les minières. Le Graphique 6 met en évidence la domination des *METS* au sein de l'écosystème de l'innovation, montrant une augmentation exponentielle de la part des familles de brevets détenues par

¹⁰ Il importe de distinguer les trois types d'innovation, soit l'innovation au niveau des produits, des processus de production et des pratiques organisationnelles. Beaucoup de produits minéraux tels le cuivre et le zinc sont non différenciables, excluant toute innovation au niveau des produits. La découverte et le développement de nouveaux produits est d'autant plus rare et lorsqu'elle survient, c'est généralement en aval de la chaîne de production minière.

Bien qu'il soit possible de considérer l'exploration comme forme d'innovation au niveau des produits, ce rapport ne traite pas de l'innovation en phase d'exploration. L'innovation au niveau des processus réfère typiquement à l'amélioration des processus de production sur le site minier alors que l'innovation au niveau organisationnel réfère à ce qui se produit hors du site de production bien que la frontière entre les deux soit parfois floue.

ces entreprises depuis 1994. Bien que ces données portent sur l’Australie, ce phénomène s’observe également à l’échelle mondiale (Steen et al., 2018b).

Graphique 6 : Propriété des familles de brevets des minières, des METS et des entités publiques en Australie



Source : Steen et al., 2018, traduit par les auteurs

5.2.2 De nouveaux rapports de force entre les METS et les minières en lien avec la transformation numérique

La transformation numérique s’accompagne d’importants changements structurels et vient bouleverser les rapports de force entre les METS et les minières. Bon nombre des technologies disruptives en développement ne sont pas le produit de l’industrie minière elle-même, mais des METS. En effet, les METS sont de plus en plus présents, et ce, tout au long de la chaîne de valeur minière. À titre d’exemple, les grands fournisseurs tels que Sandvik, Epiroc et Caterpillar pour ne nommer qu’eux ne se contentent plus de développer de nouveaux équipements en adéquation avec les tendances technologiques (automatisation, électrification), ils s’immiscent au sein des opérations en développant des systèmes digitaux pour opérer et coordonner ces nouveaux équipements (Daly et coll., 2022 ; Sánchez & Hartlieb, 2020). On parle alors de dynamique de concurrence élargie. Cette concurrence élargie pousse les équipementiers à offrir davantage que de

simples produits, en intégrant des solutions et des services adaptés aux besoins changeants de l'industrie minière (comme la durabilité, la personnalisation et la gestion de la relation client).

Cela rend les minières de plus en plus dépendantes de leurs fournisseurs pour leur propre innovation, ce qui oblige à reconsidérer ce qui constitue leur ensemble de compétences essentielles et leur avantage concurrentiel (Buia et coll., 2018). En effet, lorsqu'un fournisseur offre un avantage structurel dans des fonctions à faible valeur ajoutée, la décision d'externaliser n'est pas difficile à prendre. Cependant, de plus en plus de fournisseurs détiennent un avantage dans des fonctions considérées comme les plus critiques pour les minières. Il peut s'agir de l'extraction de minerai ou les relevés sismiques par exemple. Cela peut également concerner des domaines où, jusqu'à présent, l'entreprise minière avait un fort avantage concurrentiel, comme la découverte et le développement de ressources attrayantes ou l'excellence opérationnelle. Dans de tels cas, les entreprises doivent procéder avec beaucoup plus de prudence lorsqu'elles envisagent l'externalisation.

Buia et coll. (2018) mentionnent également que les minières pourraient éventuellement être en mesure d'externaliser des étapes entières de la chaîne de valeur. Par exemple, une entreprise minière pourrait sous-traiter l'ensemble de ses opérations, du dynamitage à la transformation, en passant par le transport, la manutention, le fret et le marketing, à des entrepreneurs disposant des données et de l'expertise nécessaires pour réduire les coûts et améliorer la productivité et la sécurité. De telles évolutions forceraient une réévaluation radicale de ce qui constitue une capacité essentielle de l'entreprise.

Steen & coll. (2018) évoquent également la compétition pour le contrôle des connaissances architecturales (*architectural knowledge*), soit les connaissances permettant la coordination et l'optimisation des différentes composantes du système minier, telles que le développement, la production, le traitement et la distribution, afin de maintenir un état optimal du système. Traditionnellement, ces connaissances étaient intégrées dans les personnes, les systèmes et les outils contrôlés par les entreprises minières ou, plus récemment, par les entreprises de services informatiques. Cependant, à mesure que le processus minier devient de plus en plus numérisé et automatisé, les frontières traditionnelles et les rôles sont remis en question. La transformation numérique se produit au niveau des composantes et des systèmes qui relient ces composantes. Par exemple, les équipements miniers mobiles lourds dépendent de plus en plus de logiciels. Des camions autonomes, tels que ceux développés par Komatsu ou Caterpillar, montrent comment les limites de la connaissance évoluent au niveau des composants. Les fabricants d'équipements d'origine fournissent, maintiennent et protègent généralement

les logiciels nécessaires au fonctionnement de ces composantes. Cette situation peut limiter la capacité des entreprises minières à améliorer ou à adapter les performances de leurs actifs, car les fabricants d'équipements peuvent restreindre l'accès au code source du système de contrôle.

Parallèlement, de nouveaux acteurs entrent dans l'industrie minière pour construire, codifier et contrôler les connaissances architecturales au niveau du système minier. Des entreprises, telles qu'IBM, peuvent exploiter des techniques propriétaires pour intégrer, analyser, simuler et prédire la production minière à l'échelle du système. Ces évolutions remettent en question la propriété future des connaissances architecturales minières et leurs marges associées, tout en soulevant des questions sur la nature de la propriété intellectuelle et de la sécurité des programmes logiciels dans l'ère numérique. En fin de compte, l'industrie minière du futur pourrait être très différente de ce qu'elle est aujourd'hui, avec des réseaux d'alliances intégrés se disputant les plateformes numériques de manière similaire à la concurrence entre Android et iOS (Steen et coll., 2018).

Se pose dans ce contexte particulier la question de la propriété des données, ce qui est, d'ailleurs, un enjeu partagé par de nombreux secteurs industriels, comme le secteur agroalimentaire, par exemple (Annie Royer et coll., 2020). Il subsiste une zone grise importante en ce qui a trait à la propriété des données produites par les diverses activités d'exploitation d'une mine par le secteur minier. À qui appartiennent les données générées par un équipement/une technologie : à la compagnie minière ou au fournisseur de l'équipement/de la technologie ? Et une fois la donnée transformée et utilisable, à qui reviennent la propriété et les bénéfices qui peuvent découler de son utilisation ? Les données sont réellement devenues un capital pour les entreprises qui vendent des technologies numériques (Annie Royer et coll., 2021). Il y aurait donc un risque réel à ce que certaines entreprises utilisent des données pour en tirer un profit financier sans partager celui-ci avec les générateurs de ces données, c'est-à-dire les sociétés minières. Dans ce contexte, il y a un risque de perte d'autonomie des sociétés minières au profit des fournisseurs de services et d'équipements.

Les sociétés minières ont donc un rôle important à jouer dans la formation du nouvel écosystème numérique. Plutôt que d'être de simples acheteurs passifs de technologie et de services, ils doivent devenir des intégrateurs de systèmes pour capturer la valeur de l'innovation à travers le réseau industriel minier et consolider leur position concurrentielle en exploitant la puissance intellectuelle de ce réseau.

5.3 L'influence des consultants impliqués dans les rapports techniques NI 43-101 dans l'adoption d'innovations

La présente section traite du processus de décision d'investissement dans des technologies innovantes et propose une analyse de 32 rapports techniques NI43-101 afin d'évaluer si ceux-ci comportent des éléments permettant de comprendre le processus d'investissement, soit des analyses coûts-bénéfices, des données quantitatives sur les OPEX, CAPEX, gains en productivité ou toute autre composante.

Dans le cadre de l'étude, un examen approfondi de 32 rapports techniques conformes à la norme NI43-101 a été fait, dont 21 nous ont été fournis par le Groupe MISA. L'objectif principal était de mener une recherche des éléments liés aux technologies d'innovation au sein de ces rapports. Cette lecture des rapports NI 43-101 constitue d'ailleurs une étape exploratoire avant de faire des entrevues avec des gestionnaires et des investisseurs. Plus spécifiquement, l'attention a été portée sur la manière dont l'innovation est appréhendée du point de vue des coûts et des bénéfices dans les projections financières associées aux projets miniers.

Un tableau de synthèse (disponible en Annexe) a été réalisé afin de déterminer les principales innovations technologiques citées dans les études de faisabilité des projets miniers au Québec des cinq dernières années, de préciser à quel stade du procédé minier elles étaient implantées, en plus d'identifier certains facteurs incitatifs à la mise en place de ces innovations, comme les partenariats R&D. Les résultats de l'analyse exploratoire des rapports NI43-101 se résument en quatre observations :

- les prévisions financières et les estimations des coûts dans les rapports présentent une incertitude significative, avec des variations pouvant atteindre entre 30 % et 50 % ;
- bien que de nombreuses informations concernant les prévisions et les coûts des équipements miniers soient fournies dans les rapports, les détails sur les innovations mises en place et leurs impacts respectifs sur les flux monétaires sont généralement peu détaillés ;
- les termes tels que « innovation », « numérique », « 5G » et « automatisation » semblent rarement mentionnés ou peu présents dans les rapports examinés ;
- l'automatisation des procédés, en particulier dans le domaine de la ventilation, ainsi que l'électrification de la flotte, sont parmi les innovations les plus couramment évoquées. La ventilation sur demande est d'ailleurs une innovation « acquise », qui a déjà fait ses preuves et donc pour laquelle le problème de financement ne se pose généralement pas.

Ces observations indiquent la pertinence d'une approche plus explicite de l'intégration de l'innovation dans les projections financières des projets miniers, en mettant davantage l'accent sur la quantification des avantages et des coûts pour une prise de décision plus éclairée.

5.4 Une coopération nécessaire entre tous les acteurs de l'écosystème minier pour faciliter l'adoption d'innovations

La clé de voute au développement de l'innovation dans l'industrie minière réside également en une coopération accrue entre les acteurs de l'écosystème, particulièrement entre les minières et les entreprises qui offrent les technologies et les METS (Beatriz Calzada Olvera, & Michiko Iizuka, 2020 ; Daly et al., 2023 ; Ediriweera & Wiewiora, 2021 ; Lazarenko et coll., 2021 ; Sánchez & Hartlieb, 2020 ; Steen et coll., 2018).

Dans un écosystème caractérisé par la prépondérance des METS, des minières comme nettes consommatrices de l'innovation et la transformation numérique du cycle d'exploitation minière, la coopération et l'établissement de relations commerciales mutuellement bénéfiques s'avèrent une nécessité pour l'innovation des minières. Cette coopération facilite et crée des incitatifs à l'innovation à plusieurs niveaux. Ediriweera & Wiewiora (2021) soulèvent que construire des relations de confiance et de collaboration entre les parties prenantes crée un environnement favorable à la transmission de savoir-faire et de connaissances et facilite les engagements contractuels *gagnant-gagnant*.

Sánchez et Hartlieb (2020) insistent également sur les initiatives de collaboration entre les METS, les minières, le gouvernement et le milieu académique. Les auteurs rapportent les succès du *World-Class Supplier Program* au Chili, un partenariat public-privé entre les sociétés minières BHO, Codelco et Antofagasta Minerals, la Fundación Chile, ainsi que d'autres institutions gouvernementales, et plus de 75 fournisseurs locaux institutions gouvernementales, ce qui a permis de développer plus d'une centaine d'initiatives en

matière d'innovation depuis son lancement en 2009¹¹. Ces initiatives permettent notamment de mutualiser le risque entre les parties prenantes.

Traditionnellement, les minières ont maintenu des relations transactionnelles avec leurs fournisseurs à travers le responsable des achats (« *procurement manager* » en anglais). Celui-ci est chargé de trouver la meilleure technologie au prix le plus bas et ensuite de structurer le contrat pour transférer le risque de livraison au fournisseur. Or, dans d'autres secteurs, tels que la construction, on constate que cette approche étouffe l'innovation, car le fournisseur se contentera de faire juste ce qu'il faut pour répondre aux exigences du contrat (Steen et coll., 2018). Sans incitatifs à trouver une meilleure solution, l'introduction d'un nouveau processus devient simplement risquée et financièrement non rentable. Les auteurs abordent également la transformation numérique et son impact positif sur la collaboration entre les minières et les fournisseurs. Ils rappellent que Goldcorp avait développé la mine Red Lake en 2000 en publiant les données géologiques sur Internet et en offrant un prix au meilleur modèle de ressource.

Sánchez et Hartlieb (2020) mentionnent également que l'externalisation de l'innovation technologique a favorisé l'émergence de fournisseurs locaux, intensifs en savoir-faire et hautement spécialisés. Ces firmes détiennent une connaissance des enjeux et des défis locaux et procurent des solutions personnalisées aux minières dans des segments niches que les grands fournisseurs ne peuvent desservir.

La coopération entre les acteurs clés de l'écosystème minier, tels que les minières et les METS, est impérative pour dynamiser l'innovation au sein de l'industrie. Ces partenariats stratégiques et les relations de confiance qu'ils engendrent créent un environnement propice à la diffusion de connaissances, à la recherche de solutions innovantes et à la gestion efficace des risques liés à l'adoption de nouvelles technologies. La transformation numérique joue un rôle essentiel dans cette dynamique. D'une part, comme mentionnée précédemment, elle redéfinit les rapports de force dans l'industrie minière. D'autre part, elle crée des conditions propices à une collaboration accrue entre les minières et leurs fournisseurs.

¹¹ Bien que le programme ait eu un impact positif sur le développement du secteur des fournisseurs de l'industrie minière au Chili, certains défis doivent être relevés. Parmi ces défis, il est nécessaire de faire monter en puissance le programme en favorisant des projets d'innovation disruptifs et à long terme, contrairement aux solutions technologiques incrémentielles typiques à l'industrie minière (Sánchez & Hartlieb, 2020a).

5.5 L'influence des investisseurs dans l'adoption d'innovations à travers l'analyse d'une simulation financière

Une simulation financière de l'implantation d'une technologie de pointe a été effectuée afin de mieux comprendre le rôle et les limites de l'aspect financier du processus d'innovation au Québec et également afin de contextualiser l'analyse financière des projets d'innovation. Son objectif principal est d'évaluer l'impact et la sensibilité de certaines variables clés, tout en cherchant à comprendre les limites potentielles d'une analyse strictement financière de type coûts-bénéfices.

Cette simulation financière vise à simuler l'adoption d'un projet innovant dans une mine aurifère québécoise fictive et permet de projeter les flux financiers actualisés et de calculer des indicateurs financiers tels que la Valeur Actuelle Nette (VAN), le Taux de Rendement Interne (TRI) et le Délai de Récupération du Capital (DRC).

Deux technologies de pointe ont été prises en considération dans cette simulation : l'électrification des équipements miniers, notamment les chargeuses (LHDs) et les camions, ainsi que l'automatisation des équipements miniers, également concernant les LHDs et les camions. Cette démarche permet d'apporter une vision plus complète de l'impact financier de l'adoption des technologies de pointe, au-delà de la seule analyse des coûts et des bénéfices.

Il s'agit de préciser avant tout que la simulation menée dans cette section a pour vocation de présenter à titre illustratif des impacts potentiels en termes de rentabilité de l'adoption de certaines technologies d'innovation. Néanmoins, les valeurs et paramètres pour le scénario de base sont basées sur un projet d'investissement minier existant, dont le rapport technique a été publié.

5.5.1 Méthodologie

Un « projet initial » sans implantation de technologie de pointe est construit à partir d'informations financières obtenues des rapports NI43-101 (voir section 14.3). En particulier, les données financières prévisionnelles examinées des projets concernent les investissements initiaux et les coûts d'opération, et figurent dans les sections 21 « Coûts d'investissements et coûts opérationnels » et 22 « Analyse économique ».

Les valeurs retenues pour le scénario de base, réputé « sans innovation de pointe », reprennent chacun des flux financiers du projet « Val-d'Or East » de 2021, tel que présenté dans le rapport technique NI 43-101 intitulé « Val-d'Or East Project NI 43-101 Technical Report & Preliminary Economic Assessment », préparé par Ausenco Engineering Canada

pour le compte de Probe Metals Inc. (Raponi et al., 2021)¹² Ce projet d'investissement minier de référence engendre une VAN de 991 M\$ au taux d'actualisation de 5 %, et indique un TRI de 47 %. Même si ce niveau de TRI de 47 % pourrait sembler élevé au premier abord, rappelons qu'il s'agit d'un projet réel documenté par un rapport NI43-101 publié, et que cette simulation est surtout présentée à titre illustratif.

Les données initiales ayant servi à la construction du scénario de base pour la simulation sont restituées à l'annexe 14.3.3. Par ailleurs, le taux d'actualisation étant généralement de 5 % dans les projets miniers examinés, c'est également ce taux qui est retenu ici dans le cadre de cette simulation.

Des hypothèses au niveau de la structure des coûts du projet initial sont donc posées en amont. À partir de ce projet initial, les coûts et les bénéfices des technologies respectives issus de la littérature sont appliqués aux flux financiers, y compris les dépenses en capital (CAPEX), les coûts opérationnels (OPEX – *mining costs*) et les revenus. Bien que plusieurs bénéfices extrafinanciers aient été recensés dans la littérature (santé et sécurité des travailleurs, bénéfices environnementaux, etc.), ceux-ci ne sont pas modélisés dans les simulations financières. D'une part, l'absence de données quantitatives quant à ces bénéfices limite l'intégration de ces aspects au modèle financier. D'autre part, l'omission de ces bénéfices d'une analyse strictement financière illustre l'inadéquation d'une telle approche dans un contexte où l'industrie est de plus en plus soumise à des pressions sociales et environnementales.

Afin de pouvoir appliquer les coûts et bénéfices issus de la littérature aux flux financiers du projet initial, il a été nécessaire d'obtenir une répartition détaillée des différents postes de dépenses¹³. D'autres hypothèses sur la structure granulaire des coûts sont donc posées à ce stade. Par la suite, deux scénarios sont élaborés pour chacune des deux technologies : un scénario de base et un scénario pessimiste. Les indicateurs financiers des projets sont ensuite comparés aux indicateurs financiers du projet initial.

Une analyse de sensibilité est effectuée en examinant les impacts d'un choc d'interruption de production, soit un des risques opérationnels majeurs envisagés par les minières. Enfin,

¹² Ce rapport est disponible à ce lien : [https://minedocs.com/21/Val-d'Or_East_\(VDE\)-PEA-09072021.pdf](https://minedocs.com/21/Val-d'Or_East_(VDE)-PEA-09072021.pdf)

¹³ Par exemple, si l'électrification des camions permet une réduction des coûts de ventilation de 80 %, il faut d'abord déterminer à quel poste de dépense appartient la ventilation, quelle proportion la ventilation occupe dans la consommation d'énergie totale, etc.

une évaluation des limites et des pistes de réflexion est réalisée quant au processus d'adoption de nouvelles technologies, en se basant strictement sur des critères financiers.

5.5.2 Hypothèses utilisées pour la simulation

Le tableau 3 présente les hypothèses, établies à partir de la littérature recensée, quant aux coûts et bénéfices associés à l'automatisation et à l'électrification des équipements mobiles (chargeuses et camions). Un scénario de base et un scénario pessimiste sont présentés.

Le scénario pessimiste a pour but de limiter la présence potentielle d'un biais de sélection dans la littérature sur les innovations technologiques. Il est possible que les projets économiquement rentables aient été documentés dans une plus large mesure que ceux qui ne l'étaient pas.

Le scénario pessimiste a été construit de façon subjective et à titre illustratif. Un portrait détaillé du tableau 3 est disponible en annexe.

Tableau 3 : Hypothèses quant aux impacts de l'implantation des technologies de pointe sur les différents postes

Automatisation			Électrification		
Postes / Scénario	Pessimiste	Base	Postes / Scénario	Pessimiste	Base
Revenus			Revenus		
Productivité	8 %	14 %	Productivité	0 %	2 %
Coûts (OPEX)			Coûts (OPEX)		
Carburant	-10 %	-20 %	Carburant	-40 %	-75 %
Maintenance	-10 %	-20 %	Maintenance	-10 %	-20 %
Ventilation	-20 %	-50 %	Ventilation	-50 %	-80 %
Salaire Main-d'œuvre directe (opérations minières)	-30 %	-50 %			
CAPEX			CAPEX		
Part des dépenses en capital de préproduction allouée aux équipements mobiles	30 %		Part des dépenses en capital de préproduction allouée aux équipements mobiles	30 %	
Part des dépenses en capital de maintien allouée aux équipements mobiles	30 %		Part des dépenses en capital de maintien allouée aux équipements mobiles	30 %	

Source : Calculs des auteurs et annexe

Le tableau 4 présente les hypothèses, établies à partir de rapports de l'industrie, quant au poids relatif des différents postes de dépenses. Par exemple, les proportions en vert indiquent que les équipements mobiles représentent 8 % des coûts totaux de préproduction et 36 % des coûts en réinvestissement de maintien.

Tableau 4 : Hypothèses quant à la structure de coûts associés aux différents postes affectés par l'implantation des technologies de pointe

Type de dépenses	%
1. OPEX (Coûts d'exploitation minière)	
1.1. Carburant	15 %
1.2. Maintenance	20 %
1.3. Salaires des opérateurs et camionneurs	30 %
1.4. Ventilation	3 %
Sous-total	68 %
2. CAPEX	
2.1. Coût de capital de préproduction	100 %
2.1.1. Coût de capital de préproduction - Mine souterraine	75 %
2.1.1.1. Pourcentage de coût de mine souterraine - Équipement mobile	10 %
2.1.1.1a. Pourcentage de coût de préproduction - Équipement mobile	8 %
2.2. Coût du capital de maintien	100 %
2.2.1. Coût de capital de maintien - Mine souterraine	76 %
2.2.1.1. Pourcentage de coût de mine souterraine - Équipement mobile	47 %
2.2.1.1a. Pourcentage de coût de maintien - Équipement mobile	36 %

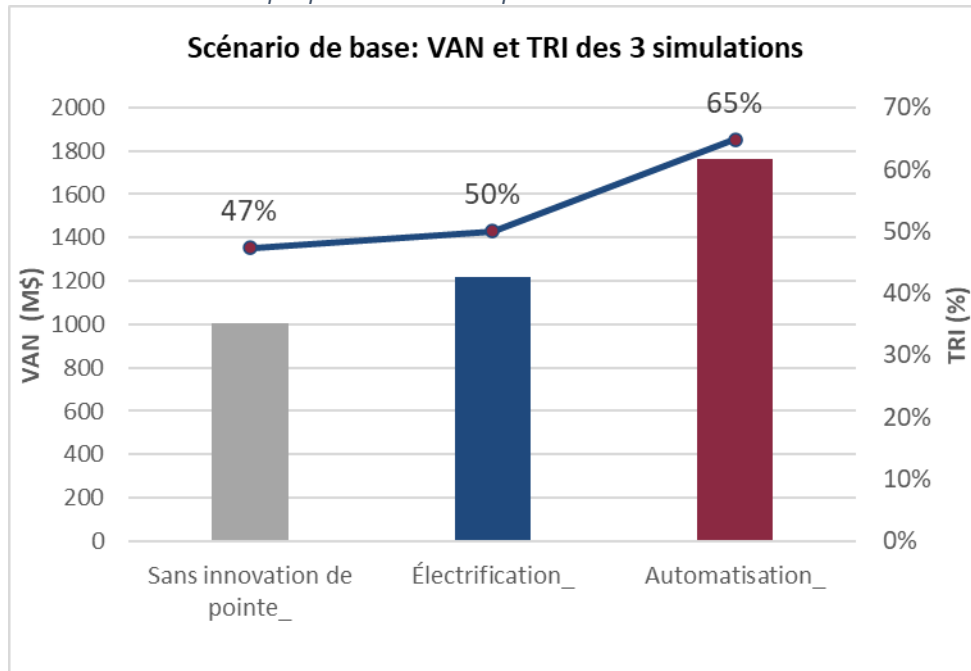
Source : Calculs des auteurs

5.5.3 Résultats des simulations

5.5.3.1 Scénario de base

Le scénario de base est construit à partir des coûts et bénéfices tirés tels quels de la littérature. Ce scénario peut être affecté par un biais de confirmation. Comme mentionné, les études et analyses coûts-bénéfices de l'industrie et de la littérature rapportent davantage les résultats positifs et soutenant l'adoption des technologies que l'inverse.

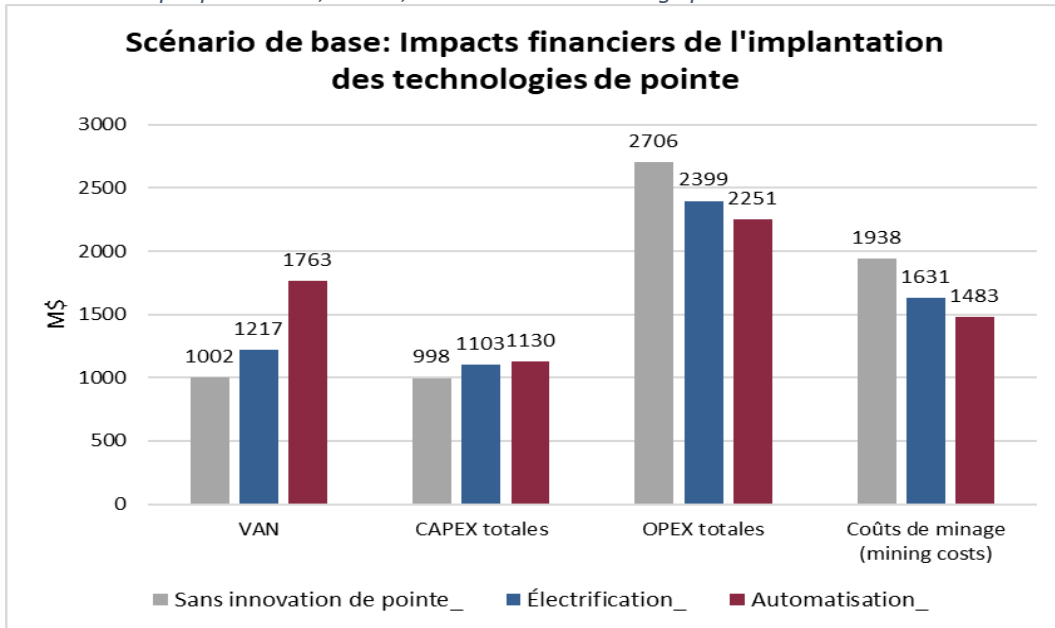
Graphique 7 : VAN et TRI pour le scénario de base



Source : Calculs des auteurs

Le graphique 7 présente les résultats du scénario de base pour l'électrification et l'automatisation des équipements miniers. La VAN initiale du projet minier sans innovation de pointe est de 1002 M\$ avec un TRI de 47 %. L'électrification entraîne une hausse de la VAN de 215 M\$ et une hausse du TRI de 3 %. Cette augmentation provient essentiellement de la diminution des coûts de carburant (-218 M\$) et des coûts liés à la ventilation (-78 M\$) sur l'ensemble de la durée de vie du projet. L'automatisation entraîne une hausse de la VAN de 761 M\$ et une hausse du TRI de 15 %. Ces gains proviennent de la diminution de la charge des salaires (-290 M\$) et de l'impact de l'augmentation de la productivité sur les revenus (723 M\$).

Graphique 8 : VAN, CAPEX, OPEX et coûts de minage pour le scénario de base

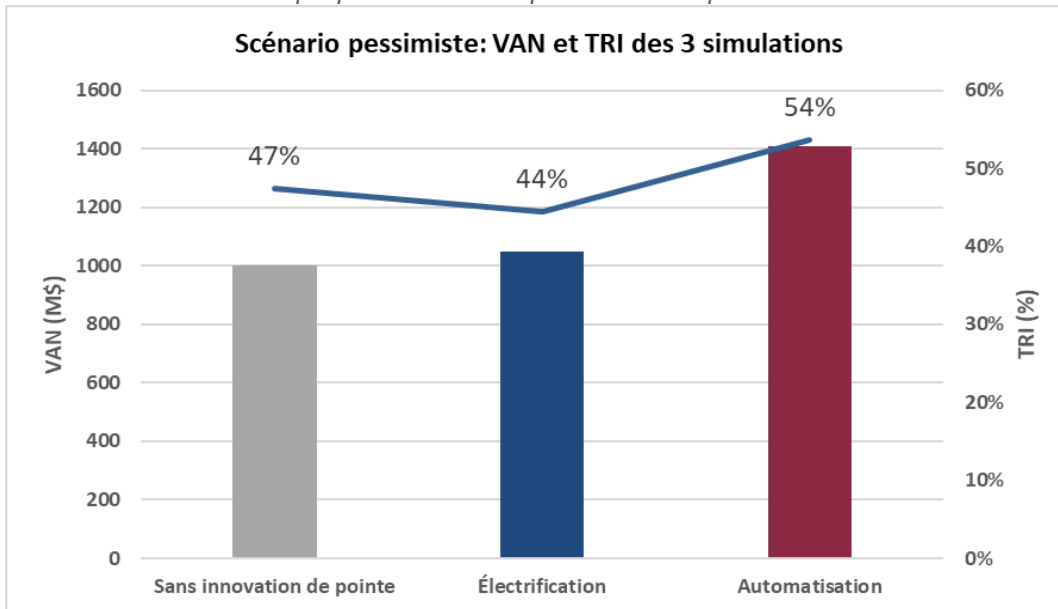


Source : Calculs des auteurs

5.5.3.2 Scénario pessimiste

Dans un scénario pessimiste où les bénéfices (et les réductions des coûts) que procurent les technologies de pointe sont largement diminués, l'automatisation et l'électrification demeurent rentables.

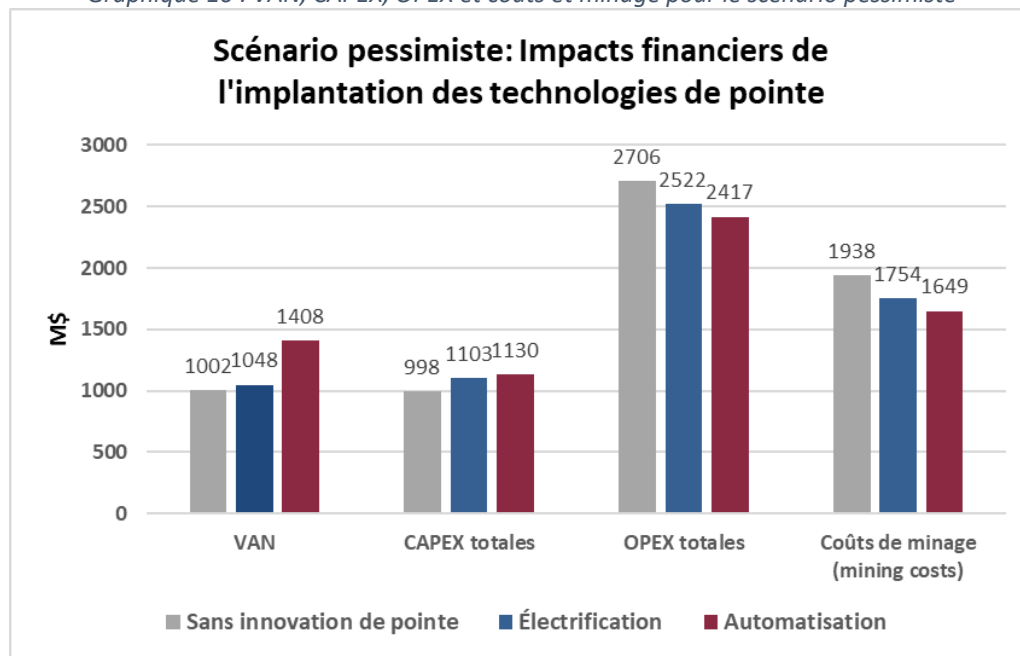
Graphique 9 : VAN et TRI pour le scénario pessimiste



Source : Calculs des auteurs

Dans le scénario pessimiste, le projet initial sans innovation de pointe demeure inchangé. Les bénéfices de l'électrification et de l'automatisation des équipements miniers sont sensiblement inférieurs au scénario de base, mais demeurent globalement positifs. Dans le cas de l'électrification, la VAN augmente de 46 M\$ alors que le TRI diminue passe de 47 % à 44 %. Cette baisse du TRI est due à une diminution moins importante des coûts de carburant et de ventilation par rapport aux dépenses en capital (infrastructures de chargement, camions et équipements) engendrées en début de projet.

Graphique 10 : VAN, CAPEX, OPEX et coûts et minage pour le scénario pessimiste



Source : Calculs des auteurs

5.5.3.3 Les deux scénarios suggèrent l'adoption de ces technologies de pointe

Les résultats présentés indiquent que l'implantation des technologies de pointe est rentable dans le scénario de base, où les gains obtenus sont les mêmes que ceux rapportés dans la littérature, comme dans le scénario pessimiste, où ces gains sont limités par des difficultés à l'adoption et l'intégration des nouveaux véhicules, des spécificités au niveau du site et des opérations, et pour contrer le biais de confirmation potentiellement présent dans la littérature.

On observe que l'automatisation apporte les plus grands bénéfices pour l'ensemble des indicateurs financiers. Un tel résultat n'est pas surprenant vu les économies engendrées au niveau des salaires des opérateurs et des chauffeurs, en plus des gains en termes de

productivité. L'électrification présente également des résultats positifs bien que moins importants. Un tel niveau de rentabilité suggèrerait que l'on adopte ces technologies ou du moins qu'on mentionne un potentiel d'adoption dans les années à venir dans les rapports NI43-101. L'analyse des rapports indique le contraire.

5.5.3.4 Choc d'arrêt de la production

Un des principaux risques opérationnels pour une mine est le risque de ne pas pouvoir opérer. Dans ce contexte, un choc d'arrêt de production a été introduit dans le cas de l'automatisation des équipements mobiles.

L'intégration complète ou l'intégration partielle à la flotte existante est un des risques opérationnels majeurs des véhicules autonomes. Si l'on introduit un choc d'arrêt de la production d'une durée de deux mois en début de projet (ce qui semble être un risque non acceptable dans le secteur minier), cela occasionne des pertes de 100 M\$ en plus de faire passer le délai de récupération du capital de 1,8 à 2,2 années.

Tableau 5 : Résultats des simulations pour l'automatisation

	Scénario initial (sans innovation)	Scénario de base automatisation	Scénario pessimiste automatisation	Pessimiste et choc d'interruption de la production de 2 mois
VAN (M\$)	1002	1763	1408	1303
TRI	47%	65%	54%	44%
Délai de récupération du capital	1.8 années	1.4 années	1.7 années	2.2 années

Source : Calculs des auteurs

5.5.4 Interprétation et conclusion

Le secteur minier présente un paradoxe : malgré une rentabilité potentielle des technologies de pointe disruptives, il semble ne pas investir à la hauteur de son potentiel. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène. Les entrevues permettront par la suite d'infirmier ou de confirmer ces hypothèses.

Tout d'abord, l'**incertitude** semble être un facteur clé. Cette incertitude concerne non seulement les technologies émergentes, mais aussi les méthodes minières

conventionnelles. Les entreprises minières pourraient hésiter à investir massivement en raison de l'instabilité inhérente à l'évolution de ces technologies et méthodes.

Une deuxième hypothèse porte sur l'approche adoptée par le secteur minier dans son ensemble. L'accent mis sur des projets individuels par les compagnies minières plutôt que sur une **approche globale** pourrait dissimuler les opportunités d'innovation à plus grande échelle. L'évaluation centrée sur la rentabilité immédiate peut entraver la capacité des entreprises minières à adopter une vision et une culture d'innovation plus large, car les incitatifs ne sont pas toujours reflétés dans l'analyse financière. Certains bénéfices au niveau environnemental et social ne sont pas captés dans des analyses financières traditionnelles par projet. Cette incapacité à intégrer ces bénéfices lors de l'évaluation de nouvelles technologies pour un projet donné freine l'adoption de ces technologies à l'échelle globale de l'industrie. Le développement de l'innovation vers une mine intelligente nécessite une vision et un engagement ferme porté par les hauts dirigeants des minières. Or, cet engagement *top-down* ne coïncide pas nécessairement avec les incitatifs à l'adoption des directeurs de site minier.

Une troisième hypothèse concerne un **degré important d'aversion aux pertes** dans l'industrie minière. Les entreprises peuvent être réticentes à prendre des risques importants, même si les gains potentiels sont substantiels, par crainte de pertes.

Les **facteurs ESG** (environnementaux, sociaux et de gouvernance) semblent également être laissés pour compte dans l'analyse financière. Une hypothèse potentielle est que le secteur minier, faute d'outils de quantification et de données, pourrait ne pas accorder suffisamment d'importance aux aspects liés à l'environnement, à la responsabilité sociale et à la gouvernance d'entreprise. Cette absence de considération des facteurs ESG dans l'évaluation individuelle de projets d'innovation entre en conflit avec les considérations que les dirigeants miniers semblent accorder à ce risque. En outre, le défi de quantifier les coûts, les avantages et les risques associés aux critères ESG dans une analyse transversale méritent d'être étudiés. Cette complexité peut décourager les investissements axés sur des critères ESG. Il semblerait que des considérations importantes telles que les émissions de carbone, ainsi que les risques réputationnels ne soient pas suffisamment pris en compte dans la prise de décision en matière d'investissement.

Dans l'ensemble, ces hypothèses mettent en lumière diverses raisons potentielles pour lesquelles le secteur minier pourrait ne pas investir pleinement malgré des perspectives de rentabilité prometteuse. Il est essentiel de mener des entrevues approfondies pour valider ces hypothèses et comprendre les motivations et les défis qui influencent les décisions d'investissement dans ce secteur. L'analyse du processus de décision d'investissement évalué dans une perspective purement financière laisse également un angle mort crucial, soit la considération des facteurs ESG dans la prise de décision. Le

chapitre qui suit approfondira cette question en exposant les cadres analytiques spécifiquement conçus pour les critères ESG dans le secteur minier. Il examinera également les répercussions des nouveaux cadres de divulgation des critères ESG sur les activités minières, avec un accent particulier sur leur influence sur les décisions d'innovation au sein de l'industrie.

6 Un contexte ESG qui influence la prise de décision et l'adoption d'innovations au sein du secteur minier

Les critères ESG (Environnementaux, Sociaux et de Gouvernance) gagnent en importance, et leur divulgation s'impose progressivement comme une exigence incontournable pour les entreprises de tous les secteurs.

Il convient, dès le départ, de délimiter les aspects qui seront traités dans cette section. En l'occurrence, les critères ESG seront abordés sous l'angle financier et extrafinancier, en excluant l'aspect opérationnel. Il ne s'agit pas ici d'évaluer les répercussions environnementales des activités minières ni de préconiser des solutions alternatives. L'accent sera mis sur la divulgation des critères ESG et sur la manière dont la performance extrafinancière des entreprises est utilisée pour orienter des décisions d'investissement éclairées dans le contexte des projets miniers.

Les critères ESG se distinguent d'une stratégie d'entreprise classique en mettant l'accent sur la durabilité, la responsabilité environnementale, la transparence et la gestion proactive des risques et des opportunités liés à l'environnement, aux aspects sociaux et à la gouvernance. Ils reflètent une approche plus holistique de la gestion de l'entreprise, prenant en compte les enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance comme un élément clé de la création de valeur à long terme.

Ce chapitre revêt alors une double importance : d'une part, il complète l'analyse de la simulation financière réalisée dans le chapitre précédent, et d'autre part, il offre un panorama détaillé démontrant comment les critères ESG pourraient être perçus comme une opportunité favorisant une rentabilité additionnelle.

Cette analyse s'appuie en partie sur des éléments de recherche développés dans le cadre d'un autre projet du CIRANO, à paraître (de Marcellis-Warin et al., Parution prochaine).

6.1 L'existence de nombreux cadres de divulgation ESG à ce jour

6.1.1 Aux origines des facteurs ESG, la responsabilité sociale des entreprises

Depuis le milieu du siècle dernier, le concept de responsabilité sociale des entreprises s'est développé jusqu'à prendre une place importante dans le rayonnement des entreprises. Son développement s'est souvent fait en réaction à des scandales environnementaux (Mignon & Sarant, 2016). Pendant longtemps, la responsabilité sociale consistait à partager des informations sur une entreprise autres que financières pour dresser un portrait plus complet de celle-ci. Pour autant, ces démarches étaient principalement

volontaires et n'offraient que peu d'éléments de comparabilité entre entreprises et secteurs. La crédibilité du contenu a pu être remise en cause à plusieurs reprises (Dando & Swift, 2003 Lock & Seele, 2016). Au début des années 2000, de premiers cadres permettant d'identifier les éléments probants sur le plan des critères ESG ont vu le jour comme le Global Reporting Initiative (GRI) (Marimon et coll., 2012).

6.1.2 Au cœur des facteurs ESG, l'analyse de matérialité

L'enjeu majeur de la divulgation ESG se retrouve dans la définition de ce qui est pertinent à partager et divulguer pour une industrie particulière. Les entreprises doivent alors définir le périmètre de ce qui les concerne et parfois jongler entre différentes classifications (comme celles du code SCIAN par exemple), ce qui devient d'autant plus complexe pour les entreprises intégrées, qui ont des activités très variées.

De plus, selon les propos et les objectifs qui guident une divulgation ESG, les informations qui vont être analysées varient très fortement. Pour établir une définition formelle, l'organisme chargé des normes de la comptabilité au niveau mondial définit ce qu'est la matérialité d'une information : « *toute information est considérée comme financièrement matérielle si l'on peut s'attendre à ce que l'omission, l'inexactitude ou l'obscurcissement de cette information puisse influencer les décisions des utilisateurs primaires de l'information financière.* » (IASB, 2018)

D'abord écrite pour les divulgations financières traditionnelles, cette définition a été étendue aux critères ESG et complétée. En effet, la matérialité financière des critères ESG concerne toutes les informations relatives à l'environnement, les facteurs sociaux et la gouvernance d'une entreprise qui peuvent influencer la situation financière de celle-ci. Il s'agit de la *matérialité financière*. L'entreprise est alors placée au cœur de l'analyse et il faut observer comment ce qui l'entoure va l'impacter. Ceci pourrait exclure le rôle que l'entreprise joue dans son écosystème et l'influence qu'elle a sur les parties prenantes qui l'entourent (population environnante, fournisseurs, ...), dès lors que cela n'a aucun impact sur la situation financière.

Cet autre champ de la matérialité s'appelle la *matérialité d'impact* et vient compléter ce continuum de divulgation (SASB, 2020). Lorsqu'une entreprise divulgue aussi largement sur les matérialités financières et d'impact, on parle alors de double matérialité des informations ESG. Il faut comprendre que l'analyse de matérialité qu'une entreprise va effectuer va être clé pour définir l'étendue des informations ESG qui vont être partagées par la suite aux différentes parties prenantes.

La partie suivante va aborder l'émergence de différents cadres de divulgation des facteurs ESG. Nous pouvons néanmoins déjà préciser que l'approche de la matérialité est très différente selon les concepteurs de cadres et les organismes de normes internationaux. À cela s'ajoute une concurrence des cadres accrue par un développement de réglementation au niveau mondial. Nous reviendrons sur ce sujet après la partie 6.2.2.

6.1.3 L'émergence des cadres de divulgation ESG

De nombreuses initiatives ont été lancées, impliquant les principaux acteurs des normes ESG (Corporate Reporting Dialogue, 2019). Plusieurs cadres coexistaient et étaient principalement adoptés de manière volontaire par les entreprises. La littérature abonde d'ailleurs sur ce sujet (Cho et coll., 2015 Corporate Reporting Dialogue, 2019 Del Giudice & Rigamonti, 2020).

Encore aujourd'hui, il persiste une grande disparité dans la divulgation des informations ESG. L'idée de rechercher des points de convergence entre toutes les normes est fréquemment évoquée, notamment pour éviter les duplications de divulgation pour les entreprises, mais surtout pour favoriser la comparabilité entre les différentes normes internationales. L'attente est d'ailleurs très forte à la fois du côté des entreprises, mais aussi auprès des investisseurs (In et coll., 2019 Jonsdottir et coll., 2022).

Sans être exhaustifs, nous pouvons présenter les principales initiatives :

- Les normes du Global Reporting Initiative (GRI) ont été publiées dès 1997 et ont régulièrement été mises à jour depuis. L'objectif principal de ces normes est de pousser les entreprises à se saisir de l'enjeu des critères ESG et de publier en toute transparence leurs informations extrafinancières (GRI, 2022). Ce cadre replace l'entreprise au sein de son écosystème et vise à la faire réfléchir sur son impact sur l'ensemble des parties prenantes qui l'entourent (GRI & SASB, 2021).
- Le CDP, anciennement *Carbon Disclosure Project*, incite les entreprises, les villes et les états à rendre disponibles sur une plateforme d'information publique les informations relatives à leur impact carbone ou sur les ressources naturelles. La question de la matérialité est moins adressée dans ce cadre que dans celui du GRI notamment (NYU - STERN, 2019). L'instance a été créée en 2000 dans le but de partager des informations relatives au climat avec le plus large auditoire possible (Andrew & Cortese, 2011). En 2022, plus de 18 000 entreprises ont partagé leurs informations sur la plateforme. Ce sont également plus de 700 institutions financières qui utilisent ces informations pour des décisions d'investissement

(CDP, 2023). Les thématiques abordées traitent du carbone, de l'eau et de la gestion des forêts (Andrew & Cortese, 2011 Niemoller, 2021).

- L'International Integrated Reporting Council (IIRC) est une coalition regroupant des régulateurs, des investisseurs, des entreprises, des organismes de normalisation, des comptables, des universitaires et des ONG. Elle propose l'*International <IR> Framework*, dont l'objectif est d'intégrer la divulgation ESG au cœur des pratiques commerciales courantes. Ce cadre repose sur sept directives clés, à savoir la focalisation stratégique et l'orientation future, la connectivité de l'information, les relations avec les parties prenantes, la matérialité, la concision, la fiabilité et l'exhaustivité, ainsi que la cohérence et la comparabilité (IIRC, 2021). Il a vu le jour dès 2010.
- L'organisme de standardisation de normes SASB a été créé en 2011 (World Economic Forum, 2019). L'accent est notamment mis sur la matérialité des divulgations et propose des recommandations de divulgation spécifiques à chacune des industries (GRI & SASB, 2021 SASB, 2020). Les normes produites sont notamment matérielles sur le plan financier, ce qui le distingue du GRI notamment, qui couvre plus largement la matérialité environnementale et sociale (GRI & SASB, 2021 SASB, 2020). Les normes de SASB concernent 77 industries différentes et présentent les normes selon 26 sujets importants répartis entre l'environnement, le capital social, le capital humain, le modèle d'affaires, l'innovation, le leadership et enfin la gouvernance.
- Enfin, le TCFD, ou *Task-Force on Climate-Related Financial Disclosure*, a été créé en 2015 sous l'égide du *Financial Stability Board* (FSB). Le cadre est basé sur quatre piliers : la gouvernance, la stratégie, la gestion des risques et opportunités et les métriques et cibles. Les recommandations sont ensuite déclinées pour les entreprises en lien avec la finance et ceux de l'industrie en général. Chaque élément est appuyé par des indicateurs, dont la définition est précisée, ainsi que l'impact sur ce qui entoure l'entreprise. Cette démarche avait déjà permis de fédérer plusieurs approches, notamment en ce qui concerne la philosophie de divulgation (Corporate Reporting Dialogue, 2019 TCFD, 2021 World Economic Forum, 2019).

6.2 Vers une harmonisation des cadres

6.2.1 Attente des investisseurs

Il apparaît clairement que les investisseurs sont en attente d'une harmonisation des cadres de divulgation ESG, afin de saisir plus finement les activités d'une entreprise, mais aussi de répondre à leurs propres objectifs d'amélioration de la performance ESG de leurs portefeuilles. Ceci inclut bien évidemment la réduction des émissions financées. Par ailleurs, les capitaux circulent dans l'ensemble des pays et l'idée d'un cadre mondial universel poursuit son chemin pour assurer une comparabilité entre les régions du monde.

Créer un langage ESG commun va prendre nécessairement du temps, mais est indispensable dans la mesure où la responsabilité des entreprises n'a de cesse d'être remise en question et que la réputation est clé dans la poursuite des activités d'une entreprise. Tout le travail qui a été fait jusqu'alors est bon puisque de nombreux organismes ont commencé à se conformer à ces cadres. L'idée d'un cadre transversal qu'un grand nombre de juridictions puisse adopter fait son chemin et a donc mené à l'établissement du Conseil International sur les normes de durabilité, ou International Sustainability Standards Board (ISSB) (de Marcellis-Warin et al., Parution prochaine).

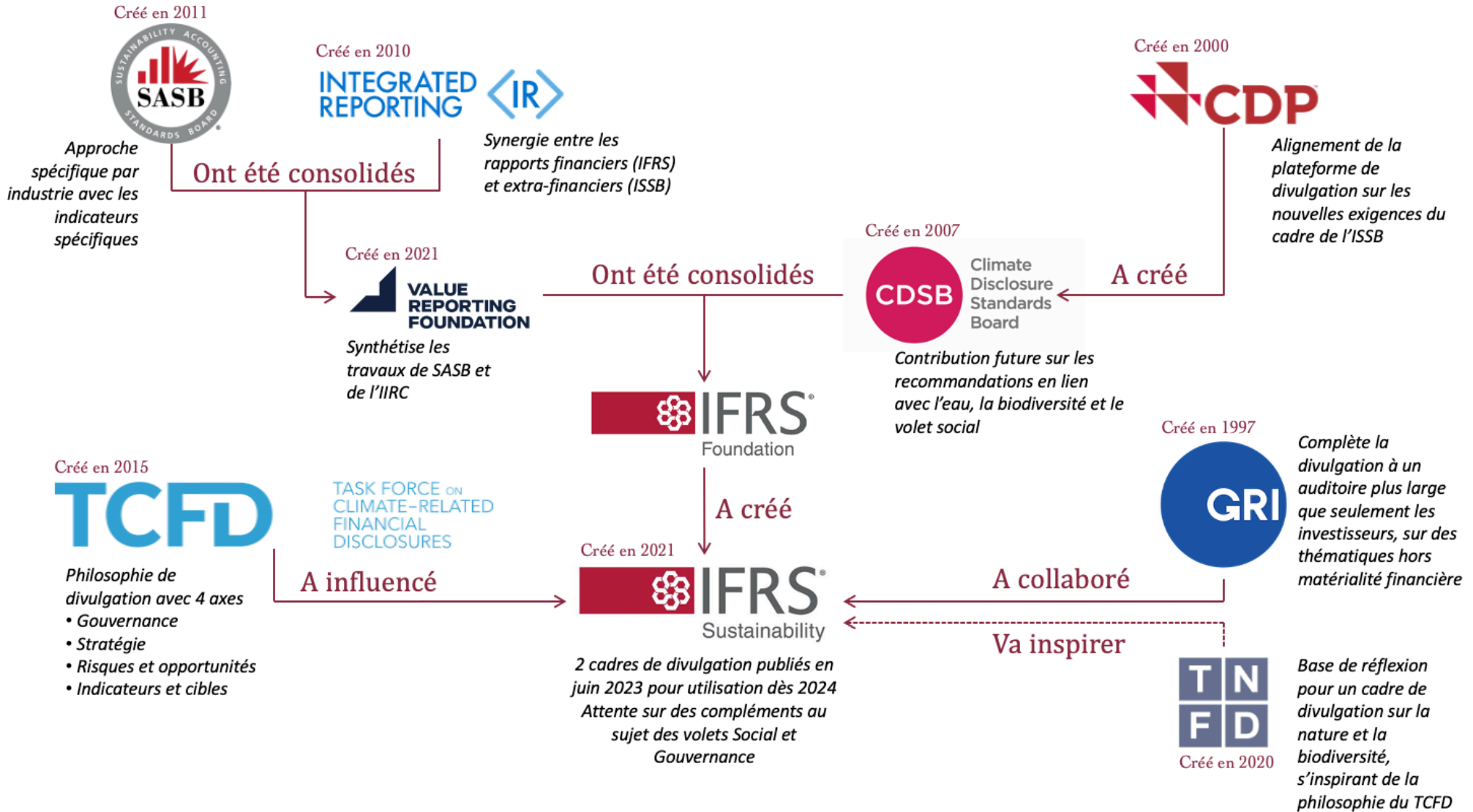
6.2.2 Le projet de l'ISSB

La création de l'International Sustainability Standards Board (ISSB) a été annoncée en novembre 2021 par la fondation IFRS, à l'origine des normes financières comptables, à l'issue de la COP26. Les deux premières normes relatives à la durabilité et au climat ont été publiées le 26 juin 2023, pour une mise en application dès 2024 (ISSB, 2023b).

Afin d'établir ce que sera le cadre de l'ISSB, un groupe technique de travail a été constitué, réunissant un grand nombre d'acteurs en lien avec les normes et cadres ESG existants : l'International Accounting Standards Board (IASB), le Climate Disclosure Standards Board (CDSB), la Financial Stability Board's (FSB) Task-Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD), la Value Reporting Foundation (précédemment la SASB Foundation et le International Integrated Reporting Council (IIRC)) et le World Economic Forum (WEF) et la Measuring Stakeholder Capitalism Initiative. La première publication du groupe de travail présentait notamment les exigences générales pour la divulgation des informations financières relatives au développement durable, ainsi qu'un prototype d'un cadre de divulgation à propos du climat. Les documents définitifs ont donc été publiés fin juin 2023, conformément au calendrier prévu.

La Figure suivante présente la contribution de l'ensemble des anciens organismes de normes et de cadres de divulgation au futur projet de l'ISSB. Le nouveau cadre de l'ISSB n'est en revanche pas applicable en l'état au niveau des juridictions canadiennes. Le Conseil canadien des Normes d'Information sur la Durabilité (Canadian Sustainability Standards Board, ou CSSB) a pour objectif de faire entendre la voix du Canada dans les instances de l'ISSB, mais aussi de s'assurer que les nouvelles normes de l'ISSB puissent s'appliquer dans le pays. Il incombera ainsi à l'ACVM au Canada puis à l'AMF au Québec de prendre une décision quant au caractère obligatoire de la divulgation ESG pour les entreprises (CCNID, 2023).

Figure 23 : Cartographie des contributeurs à l'établissement des normes de l'ISSB



Source : Inspiré de AuditBoard (2022), traduit et complété par les auteurs

Une fois cette approche d'harmonisation présentée, il convient d'aborder les nouveaux enjeux que cela pourrait soulever. En effet, l'approche de l'ISSB s'inspire de ce que faisait le TCFD et vise donc une matérialité financière. Les deux cadres qui sont à un stade de développement le plus avancé sont l'ISSB et le cadre européen. La différence fondamentale entre le cadre européen et le cadre de l'ISSB est que la matérialité des divulgations sera une double matérialité : matérialité d'impact et matérialité financière.

Une récente sortie du président de l'ISSB, Emmanuel Faber, a relancé le débat autour d'une telle divergence entre les deux cadres qui pourraient se faire concurrence. Selon lui, il est urgent d'agir et l'approche de la double matérialité va engendrer des difficultés importantes de mise en conformité, en raison notamment de la transparence trop ambitieuse qui va s'imposer aux entreprises (Emmanuel Faber, 2023).

Il faut néanmoins préciser que se conformer aux règles européennes en termes de double matérialité, c'est, dès lors, se conformer quasiment automatiquement aux futures normes de l'ISSB. Lors d'une rencontre en novembre 2022, l'ISSB a d'ailleurs confirmé les efforts d'interopérabilité des normes avec le cadre européen (ISSB, 2022). Dans le cadre de la COP15 pour la biodiversité, un haut dirigeant-conseil de l'ISSB a témoigné à l'équipe de recherche de travaux en vue de définir quelles zones d'intersection devraient être définies entre le cadre européen et celui de l'ISSB, de façon à empêcher une hypothétique double divulgation de la part des entreprises.

Alors, pourquoi cela devrait-il aussi concerner les entreprises canadiennes ? En réalité, cette nouvelle réglementation européenne devrait s'appliquer également aux entreprises étrangères (Holger, 2023) :

- qui ont des titres sur un marché réglementé européen
- dont le chiffre d'affaires annuel dans l'UE est supérieur à 150 millions d'euros et dont la succursale dans l'UE a un chiffre d'affaires net supérieur à 40 millions d'euros
- si une des filiales européennes d'une entreprise canadienne répond à au moins deux des critères suivants
 - plus de 250 employés basés dans l'UE,
 - un bilan supérieur à 20 millions d'euros,
 - un chiffre d'affaires local supérieur à 40 millions d'euros.

Toujours selon l'article du Wall Street Journal, ce sont près de 1300 entreprises canadiennes qui pourraient être concernées (Holger, 2023).

Finalement, comment les entreprises minières devraient-elles se conformer à ces futures approches ? Une chose est sûre, pour le moment de telles obligations de divulgation

n'existent pas au Canada ni au Québec. Pour autant, l'essence même de l'activité d'exploitation minière est en lien direct avec les communautés environnantes et des parties prenantes plus larges que seulement des investisseurs. Il paraît pertinent de s'y préparer et de nombreuses entreprises du secteur ont déjà commencé à le faire, nous y reviendrons dans la partie 6.3.

6.2.3 La place de la biodiversité dans les nouveaux cadres de divulgation

Récemment, l'ISSB a annoncé son intention d'inclure la biodiversité dans ses normes de durabilité. Cette décision a été prise lors des rencontres de la COP15 à Montréal, qui visent à protéger la biodiversité à l'échelle mondiale. La biodiversité joue un rôle crucial dans la santé de notre planète et est essentielle au bien-être de l'humanité. De plus, les activités minières sont intimement reliées au maintien de la biodiversité. L'accord de Kunming-Montréal vise désormais notamment à protéger 30 % des aires terrestres et maritimes d'ici 2030, mais également à restaurer 30 % des écosystèmes actuellement dégradés (CBD, 2022).

En s'appuyant sur les travaux de la Task-Force on Nature-related Financial Disclosures (TNFD), qui s'inspire elle-même du cadre du TCFD, l'ISSB souhaite donc intégrer ces recommandations à moyen terme dans les nouveaux cadres qui restent à publier (ISSB, 2022).

6.3 Secteur minier et ESG

6.3.1 Les objectifs spécifiques des activités minières

Il est aussi pertinent de voir l'exposition du secteur minier à l'avènement de la divulgation ESG. Tout d'abord, les Objectifs de Développement Durable (ODD) de l'ONU constituent une racine commune. Un rapport de l'UNDP (2016) présente les incidences de l'activité extractive, dans laquelle l'exploitation minière se trouve. Tous les ODD peuvent être impactés par les activités extractives, dans un sens positif ou négatif. Le document résume que les entreprises du secteur minier peuvent se concentrer sur les trois volets environnemental, social et de développement économique.

Dans le détail, pour l'environnement, il s'agit notamment d'instruire les objectifs relatifs à l'eau (ODD6), la vie terrestre, incluant donc la préservation de la biodiversité (ODD15), l'énergie propre et accessible (ODD7) et la lutte contre les changements climatiques (ODD13). Les objectifs reliés à l'inclusion sociale concernent l'éradication de la pauvreté (ODD1), l'égalité entre les sexes (ODD5), la réduction des inégalités (ODD10), ainsi que la paix, justice et institutions efficaces (ODD16), en lien direct avec la licence sociale

d'opération, bien connue dans le secteur minier. Enfin, le volet du développement économique couvre le travail décent et la croissance économique (ODD8), les infrastructures, l'innovation et l'industrialisation (ODD9) et enfin la consommation et la production responsables (ODD12). En conclusion, tous ces points se retrouvent précisément dans les cadres de divulgation ESG que nous avons évoqués précédemment. Mancini & Sala (2018) confirment d'ailleurs la pertinence de ces éléments que l'on peut retrouver dans plusieurs cadres (GRI, directive européenne ou analyse sociale de cycle de vie) et insistent sur l'importance que revêtent les impacts sociétaux des mines dans le développement durable, volet qui, pour l'instant, n'est pas instruit par l'ISSB, mais en projet.

Par ailleurs, dès 2006, Jenkins & Yakovleva notent l'importance dans l'évolution des rapports RSE des compagnies minières qui augmentaient les sujets traités dans les rapports, en conformité avec des cadres existants, ainsi que des difficultés dans l'uniformisation des données partagées. Les cadres ou les normes cités dans cette revue de littérature présentent des recommandations globales pour tous les secteurs d'activité.

En revanche, certains complètent avec une approche spécifique par secteur, comme l'ISSB notamment. Ainsi, le volume 10 de l'annexe du cadre de divulgation relié au climat de l'ISSB mentionne sept indicateurs spécifiques pour le secteur minier. Il s'agit notamment des émissions directes (Scope 1) de gaz à effet de serre (GES), d'une analyse des méthodes de réduction des émissions, de la consommation énergétique et de la consommation en eau. Deux indicateurs relatifs à l'activité minière spécifiquement complètent la liste, à savoir les volumes de production et le nombre d'employés (ISSB, 2023a). Ces éléments sont issus d'anciennes normes, celles de SASB. Par ailleurs, dans la version de 2018 des normes de l'organisme de SASB, la liste était encore plus étoffée et contenait des indicateurs en lien avec les facteurs sociaux et de gouvernance.

Dans la norme de SASB de 2018, il y avait la liste d'indicateurs ci-dessous : (SASB, 2018)

- les émissions atmosphériques des polluants suivants : CO, NOx (à l'exclusion de N2O), SOx, particules en suspension (PM10), mercure, plomb et composés organiques volatils ;
- poids total des déchets de résidus de mine, pourcentage recyclé ;
- poids total des déchets de traitement des minerais, pourcentage recyclé ;
- nombre de bassins de décantation des résidus de mine, ventilé par potentiel de risque MSHA ;

- description des politiques et pratiques de gestion environnementale pour les sites actifs ;
- pourcentage de sites miniers où le drainage rocheux acide est : censé se produire, activement modéré, et en cours de traitement ou d'assainissement ;
- pourcentage de réserves prouvées et probables dans ou à proximité de sites bénéficiant d'un statut de conservation protégé ou accueillant l'habitat d'espèces menacées ;
- pourcentage de réserves prouvées et probables dans ou à proximité de zones de conflit ;
- pourcentage de réserves prouvées et probables dans ou à proximité de terres autochtones ;
- discussion sur les processus de mobilisation et les pratiques de diligence raisonnable concernant le respect des droits de la personne, des droits des peuples autochtones et des opérations dans les zones de conflit ;
- discussion sur les processus visant à gérer les risques et opportunités associés aux droits et intérêts communautaires ;
- nombre et durée des retards non techniques ;
- pourcentage de la main-d'œuvre active couverte par une convention collective, ventilé par employés américains et employés étrangers ;
- nombre et durée de grèves et grèves patronales ;
- taux d'incidence total MSHA, taux de mortalité et taux de fréquence des presque-accidents (NMFR) et moyenne des heures de formation à la santé, à la sécurité et aux interventions en cas d'urgence pour les employés à temps plein et les employés salariés ;
- description du système de gestion visant à prévenir la corruption sur toute la chaîne de valeur ;
- production dans des pays figurant dans les 20 derniers rangs de l'index des perceptions de la corruption établi par l'organisme *Transparency International*.

Or, ces notions à destination des investisseurs ne couvrent de fait pas la complexité de l'ensemble des activités minières. D'autres cadres permettent de compléter l'analyse de la matérialité, en couvrant un impact global plus large des entreprises. C'est notamment le cas d'initiatives comme celle portée par l'Association Minière du Canada (AMC) intitulée *Vers un Développement minier Durable* (VDMD). Dans ce cadre, les thématiques abordées couvrent à nouveau tous les éléments de critères ESG déjà mentionnés : changements climatiques, santé-sécurité, relations avec les communautés, biodiversité, gestion des crises, gestion des résidus miniers et prévention du travail forcé et du travail des enfants.

La divulgation selon cette norme est volontaire, bien que tous les membres de l'AMC, et a fortiori de l'AMQ au Québec, sont obligés de répondre aux exigences et de montrer une progression dans leurs résultats, pour pouvoir être membres (AMC, 2022).

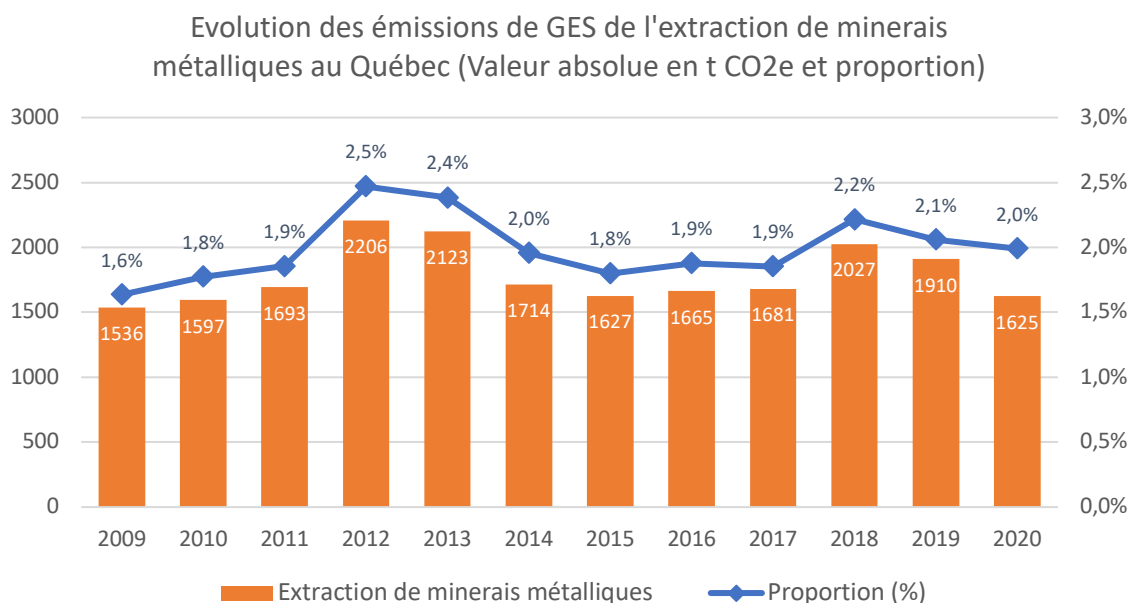
Un autre cadre global spécifique a été développé par le GRI et est actuellement en phase de retours d'avis par les acteurs du secteur. La réflexion va nettement plus loin que les recommandations de l'ISSB avec près de vingt-cinq sujets différents abordés dans la norme, couvrant tous les volets de l'ESG et s'alignant également avec les ODD de l'ONU (GSSB, 2023a). Nous mentionnions plus haut l'importance de l'analyse de matérialité. Il s'agit ici d'une matérialité d'impact, donc le cadre engage l'entreprise à divulguer des informations qui permettent de la positionner dans sa relation avec l'environnement qui l'entoure. Lors d'un récent webinaire, le GSSB, en lien avec l'ISSB, mentionnait la publication prochaine de ce rapport lors du premier trimestre 2024 (GSSB, 2023b).

6.3.2 Les impacts de l'industrie minière

La littérature nous informe également sur le rôle de l'activité minière dans le développement durable. Azadi et coll. (2020) affirment notamment que la production primaire de minéraux et de métaux a généré environ 10 % des émissions mondiales de GES en 2018. L'article souligne également le rôle que joue l'industrie minière dans la décarbonation de l'énergie et l'électrification des usages et qu'il est donc indispensable que sa propre réduction de GES soit menée pour toutes les filières minérales.

Au Québec, les données de l'ISQ précisent que, depuis 2009, le secteur de l'extraction de minerais métalliques représente environ 2 % des émissions de GES de la province, proportion stable depuis plusieurs années. Il faut noter que les dernières données disponibles sont pour 2020 (ISQ, 2023).

Figure 24 : Évolution des émissions de GES au Québec pour le secteur de l'extraction de minerais métalliques (2009-2020)



Source : Québec, 2023

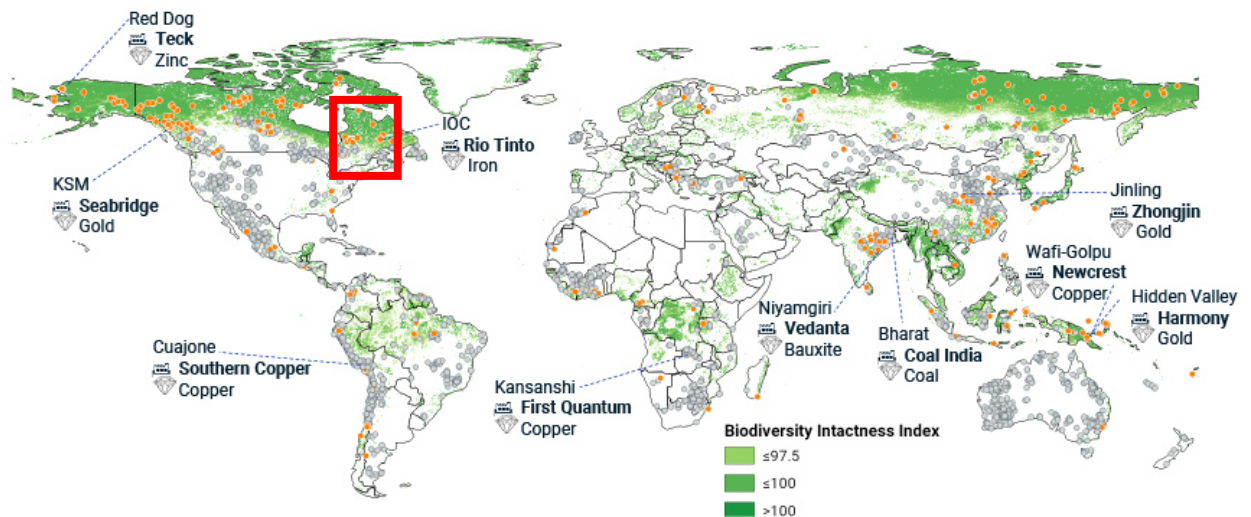
Par ailleurs, les contraintes des chaînes d’approvisionnement risquent de s’accroître en raison de la pression sur les métaux indispensables à cette transition énergétique. De plus, les risques ESG associés à cette exploitation sont élevés et les réserves minières actuelles sont fortement exposées (Lèbre et al., 2020). Une autre étude insiste également sur l’influence du prix des commodités, notamment le cuivre, sur l’opportunité d’exploiter des gisements jusqu’alors non rentables. Les conséquences ESG associées pourraient être autrement plus importantes (Valenta et coll., 2019).

Enfin, la biodiversité est un enjeu majeur pour les entreprises minières, notamment en raison de la localisation des gisements dans des zones protégées et toujours plus reculées des territoires urbanisés. La réponse à la demande croissante de minerais rehausse les risques associés à une dégradation de la biodiversité dans des zones protégées (Sonter et coll., 2020).

L’un des enjeux majeurs du développement de nouvelles mines concerne également le fait que les zones qui vont être exploitées se situent parfois dans des territoires encore exempts de toute activité humaine. Sur la Figure 25, le carré rouge définit globalement le Québec et l’on peut noter que plusieurs projets miniers sont en développement et que cela correspond avec des zones avec un niveau d’intégrité de biodiversité très haut (Newbold et coll., 2016). Ces nouveaux projets pourraient alors générer des considérations environnementales nouvelles et d’acceptabilité sociale des populations

locales. L'acceptabilité sociale de nouveaux projets miniers devra également être assurée pour des projets qui vont se rapprocher des centres urbains. Le cas de la mine Malartic située dans le centre urbain du même nom est un bel exemple de réussite au Québec (Agnico Eagle, 2023b).

Figure 25 : Cartes présentant la superposition des zones intactes et les projets miniers



Source : Newbold et coll., 2016

Une autre étude, très complète, tente de fédérer de nombreuses études sur ce qui peut constituer une « mine responsable » et fait notamment le constat d'une multitude de démarches existantes avec plus de 100 standards dans l'industrie, mais sans réelles contraintes de mise en place par une réglementation. L'analyse ajoute également que l'innovation au sein de l'industrie minière concerne principalement l'amélioration des processus pour couper des coûts plutôt que de réviser la technique d'extraction minière qui est plutôt stable depuis des dizaines d'années (SystExt, 2023).

6.3.3 Le déploiement de la divulgation ESG au sein de l'industrie

Il convient de rappeler que la place du secteur minier dans la transition énergétique est primordiale. Le besoin de terres rares est très fort et aucun dérèglement en lien avec des scandales liés aux facteurs ESG ne serait tolérable.

Le secteur minier doit donc se placer en position d'anticipation des réglementations, notamment en raison des délais impartis à la phase d'exploration puis d'exploitation d'un gisement (Vivek Salgaocar, 2022). De façon à réduire l'impact environnemental des activités minières, l'amélioration de l'efficacité des opérations est le moyen qui est

majoritairement privilégié. Ce processus s'appuie notamment sur une automatisation de nombreux processus, et donc de la génération de données d'exploitation en grande quantité. En s'appuyant sur des solutions d'analyse de données, des choix plus éclairés pourraient être faits pour améliorer la performance ESG des entreprises. Il est d'ailleurs admis qu'une bonne performance ESG induit une meilleure réputation de l'entreprise auprès des investisseurs et du grand public (Crosse, 2022).

Le développement de logiciels miniers est aussi en forte accélération ces dernières années pour répondre aux besoins croissants d'exploitation de la donnée. Les critères ESG relèvent aussi de l'excellence opérationnelle des entreprises. L'innovation à travers des solutions de science des données influence l'efficacité des équipes et permet aussi de générer des données pour répondre aux exigences de divulgation ESG. La clé de voute du fonctionnement des mines est de pouvoir donner « au bon moment et à la bonne personne » l'information utile à la prise de décision, que cette dernière soit opérationnelle ou stratégique. Le travail en silo est désormais révolu et la valorisation du partage de l'information est indispensable pour réussir à optimiser l'activité des mines. La question du développement des innovations passe pour l'instant dans des technologies qui sont ensuite rachetées par les mines dans un processus de fusion-acquisition. Les solutions sont développées par des acteurs tiers pour le secteur minier, puis vendues pour améliorer la productivité des mines (International Mining, 2023).

Des exemples de rapports ESG alignés avec des cadres connus commencent à apparaître. Des entreprises comme Agnico Eagle partagent 14 documents alignés avec 14 cadres différents (Agnico Eagle, 2023a). Le projet minier de Falco Resources¹⁴ a récemment produit son rapport ESG pour l'année 2021, au travers de la plateforme Onyen, qui semble être plutôt orienté pour des entreprises du secteur minier, et s'aligner avec les objectifs des Nations-Unies selon les pièces jointes du document. Le projet Falco est encore en phase de développement et n'est pas entré dans sa phase d'exploitation. Dès lors, beaucoup d'indicateurs ne sont pas encore remplis, mais font état d'une volonté de les mettre à jour. Plusieurs liens renvoient vers des documents externes pour étayer le propos et décrire les engagements de l'entreprise. Enfin, les critères E, S et G sont couverts par cette divulgation (Falco Resources, 2023).

Par ailleurs, les résultats de Christensen et coll. (2017) indiquent que les entreprises minières renforcent les normes de santé et de sécurité au travail lorsqu'elles sont tenues de rendre compte de ces incidents dans leurs documents financiers. La différence est

¹⁴ Ce document nous a été fourni par le Groupe MISA.

notamment notable entre les entreprises cotées qui sont obligées de divulguer ces incidents et celles qui ne le sont pas. L'article souligne également l'importance des rapports intégrés mêlant documents financiers et divulgation extrafinancière, élément dont les récents cadres de divulgation font la promotion.

6.4 Divulgation ESG et impact financier

Un des points clés de la divulgation ESG est d'une part son adoption et d'autre part sa capacité à transformer durablement les activités de l'industrie minière. Il apparaît intéressant de se poser la question de l'impact potentiel ou avéré de l'amélioration de l'impact financier dans le cas de bonnes performances ESG.

6.4.1 Critères ESG et performance financière

La méthode utilisant des flux de trésorerie actualisés permet d'utiliser un facteur d'impact sur le taux d'actualisation pour intégrer les considérations ESG. Pour autant, cette méthode semble avoir deux principaux écueils. En 2014, Bos mentionnait qu'il y avait très peu d'études qui permettaient de chiffrer convenablement l'influence d'une bonne ou d'une mauvaise performance ESG sur un taux d'actualisation. Il ajoutait également que le fait de supposer une influence sur le taux d'actualisation peut générer un double comptage de l'impact ESG. Dans le cas d'un secteur déjà très risqué, et dont la performance ESG dans son ensemble est déjà connue, l'influence sur le taux d'actualisation est déjà comptabilisée. D'autres méthodes d'analyse pourraient être de considérer un ajustement des flux de trésorerie future si cela est relié à un choc majeur (rupture de barrage de rétention, décès d'un ouvrier sur un site). Enfin, l'auteur mentionne les analyses multiples pour intégrer les facteurs ESG dans l'analyse. Quoi qu'il en soit, donner une valeur à l'ESG reste compliqué du point de vue du capital.

Chen & Yue, (2022) présentent dans un rapport de recherche un modèle statistique se basant sur les données de Refinitiv pour tester des hypothèses de corrélation entre les performances ESG des entreprises, la divulgation ESG et les controverses ESG d'un côté et le coût de la dette, le coût du capital et le coût des fonds propres (*cost of equity*). Les résultats tendent à prouver qu'un niveau de divulgation élevé a plutôt tendance à augmenter le coût du capital, bien que légèrement. En termes de performance ESG, aucune conclusion ne peut être tirée du fait que cela influe sur les différents coûts étudiés. En revanche, en séparant les trois catégories E, S et G, le volet social a une très forte corrélation à la baisse pour toutes les catégories de coûts considérés.

Ce point est important étant donné l'importance de la licence sociale d'opération pour le secteur minier. Les conclusions suggèrent qu'il y a certainement des relations non linéaires entre les facteurs ESG et le coût de la dette, et donc qu'il doit exister un optimum à trouver pour les entreprises pour chercher à réduire le coût de la dette. Le document ajoute en revanche qu'il y a une corrélation négative entre les émissions de GES et le coût du capital. Ce point est très intéressant dans le cadre de la transformation des procédés des entreprises minières vers une électrification de la flotte de véhicules et la réduction de la consommation d'énergies fossiles.

Par ailleurs, une analyse présente le financement en capital-investissement et les liens qui peuvent être faits avec les critères ESG (Crifo et coll., 2015). Il apparaît premièrement que les mauvaises pratiques ESG ont un impact plus fort que les bonnes pratiques ESG, se traduisant notamment par une prime de risque « d'irresponsabilité » des entreprises. De plus, les politiques mises en place par les entreprises influencent la valeur associée à l'entreprise avec :

- une baisse de 11, 10 et 15 % de la valeur des entreprises pour des enjeux reliés respectivement au E, au S et au G, dans le cas de politiques irresponsables
- une hausse de 5, 5,5 et 2 % pour la valeur des entreprises pour des enjeux reliés respectivement au E, au S et au G, dans le cas de politiques responsables

Des travaux de recherche ont été entrepris pour identifier plus finement la façon dont allaient se répercuter les enjeux de divulgation ESG pour les entreprises. L'étude de Gjergji et coll. (2021) montre notamment que cela pourrait augmenter le coût du capital pour les PME, et plus particulièrement le volet environnemental de la divulgation. Étant donné la composition du tissu économique québécois dans le secteur minier, il peut être intéressant de questionner l'incitatif financier associé à une amélioration de la performance ESG.

D'autres exemples de corrélation de performance financière des entreprises avec les critères ESG ou bien la performance RSE sont présents dans la littérature et présentent des coefficients de corrélation ou des modèles statistiques, plutôt que des données claires sur la baisse effective du coût du capital. On peut citer (El Ghoul et coll., 2011 ; Gregory et coll., 2014 ; Ng & Rezaee, 2015 ; Reverte, 2012). Une référence académique dans la relation entre la divulgation d'information extrafinancière et la performance financière se trouve dans l'article de Surroca et coll. (2010) et qui confirmait une relation indirecte sur cet aspect, principalement en lien avec l'effet médiateur des ressources intangibles de l'entreprise.

6.4.2 Facteurs ESG et coût du capital

Un des seuls documents qui mentionnent explicitement une estimation de la valeur pour la baisse du coût du capital relié aux facteurs ESG se trouve dans des travaux publiés par le MSCI, un des plus gros joueurs dans la gestion des données ESG d'entreprises.

Les entreprises avec de hauts scores ESG ont en moyenne un coût du capital de 6,16 %, contre 6,55 % pour les entreprises avec les scores ESG les plus bas. Ceci constitue une baisse légèrement supérieure à 5 % du coût du capital entre les entreprises des quintiles extrêmes de la base de données de MSCI (Lodh, 2020).

Dans un podcast de McKinsey, Robin Nuttall échange avec Sara Bernow sur l'importance des scores ESG et leur développement. Il apporte une statistique intéressante au sujet de la baisse du coût du capital pour des entreprises qui ont de bons scores ESG : « *Il apparaît qu'un meilleur score ESG se traduit par un coût du capital inférieur d'environ 10 %, car les risques qui affectent votre entreprise, en termes de licence d'exploitation, sont réduits si vous avez une proposition ESG solide.* » Il appuie son propos sur le fait que sur près de 2000 études académiques, 75 % d'entre elles confirment la relation positive entre scores ESG et retours financiers (Nuttall & Bernow, 2020).

6.4.3 Favoriser le déploiement de l'ESG dans le secteur minier québécois

Il apparaît dès lors clairement que l'intérêt pour le respect des critères ESG va s'accroître dans les prochaines années pour de nombreuses parties prenantes. Les investisseurs ne seront plus désormais les seuls à considérer ce type d'information. Cependant, de nombreuses questions restent en suspens, à commencer par l'éventuel incitatif pour les entreprises minières à adopter une politique résolument orientée vers des pratiques ESG robustes et les plus vertueuses possibles.

La littérature ne permet pas aujourd'hui de statuer de façon certaine sur d'éventuels bénéfices financiers qui pourraient être obtenus par une divulgation. Comment le secteur minier québécois ressent-il l'avènement de l'augmentation des demandes de transparence ? Où en est-il rendu dans sa transition ? Il peut être pertinent de se questionner sur le degré de préparation du secteur à ce sujet.

La licence sociale d'opération semble être un élément indispensable pour opérer au Québec. Comment cela se manifeste-t-il sur le terrain ? Y a-t-il une approche québécoise spécifique ?

Enfin, l'enjeu de secteur industriel comme le secteur minier va être d'aligner la stratégie avec la mise en place d'opérations cohérentes. Comment est-ce que cela se traduit dans

les décisions d'investissement au Québec et les stratégies d'innovation ? La demande de minéraux va aller croissante, mais les méthodes de travail pourraient évoluer. Comment le lien est-il fait entre innovation et exigences ESG ?

Autant de questions auxquelles nous allons tenter d'obtenir des réponses à travers une consultation des acteurs du secteur minier.

BILAN des chapitres 3 à 6

Revue de littérature sur les facteurs pouvant influencer l'adoption d'innovations dans l'industrie minière

Les observations et hypothèses découlant de la revue de littérature concernant les facteurs qui peuvent influencer l'adoption de l'innovation devront être soumises à une validation lors des entretiens réalisés au Québec (qui seront présentés au chapitre 7), afin de déterminer non seulement leur applicabilité dans le contexte québécois, mais aussi de vérifier s'ils demeurent pertinents compte tenu des perturbations récentes, principalement liées à l'adoption massive des technologies numériques.

En quoi l'innovation peut-elle aider à relever les défis des sociétés minières ?

L'industrie minière est en constante quête d'innovation pour faire face aux défis de productivité liés à la diminution de la teneur en minerai des gisements, exigeant des excavations plus profondes et une gestion de la géotechnique complexe. Les gains de productivité passés, issus de l'augmentation de la taille des équipements et des projets miniers, ont atteint un point de saturation. Le boom des commodités dans les années 2000 a conduit à des profits record, mais a entraîné une chute de productivité due à l'expansion rapide des activités minières. L'innovation est aussi essentielle pour relever les défis liés à la main-d'œuvre en modernisant l'industrie et en répondant aux préoccupations sociétales des travailleurs. De plus, les pressions croissantes en matière de performance environnementale, sociale et de gouvernance créent de nouveaux impératifs pour l'industrie, incitant à l'innovation pour répondre aux réglementations environnementales strictes et aux attentes des investisseurs.

En quoi la structure de l'industrie et son environnement d'affaires imposent d'importantes contraintes et façonnent quand et comment se produit l'innovation ?

Les contraintes et incitatifs à l'innovation dans l'industrie minière sont déterminés par des caractéristiques économiques inhérentes au secteur, par un écosystème d'innovation et par le contexte organisationnel de cette industrie.

La transformation numérique est aussi un changement de paradigme qui engendre de profondes répercussions sur l'écosystème d'innovation et le contexte organisationnel. Les rapports de force entre les minières et les METS sont appelés à basculer en faveur des METS sans une réponse stratégique des entreprises minières. La transformation

numérique favorisera toutefois des réseaux d'entreprises plus agiles, basés sur l'utilisation des données et des plateformes numériques, pour relever les défis liés aux coûts de l'énergie, à la gestion de l'eau, aux emplacements éloignés et à la licence sociale d'exploitation.

L'industrie minière se caractérise par l'épuisement de gisements non renouvelables, ce qui favorise l'innovation incrémentale centrée sur la réduction des coûts plutôt que des ruptures technologiques majeures. L'exploitation minière nécessite d'énormes investissements avant de générer des revenus et les décisions d'innovation sont souvent prises au moment de l'étude de faisabilité. Ces caractéristiques inhérentes au secteur font en sorte que l'on constate une très grande aversion au risque et surtout une aversion aux pertes, limitant l'adoption rapide de nouvelles technologies, avec des délais d'adoption estimés à 13 ans. Le prix des minéraux étant influencé par la conjoncture économique mondiale, l'innovation minière se concentre sur la réduction des coûts plutôt que sur des produits novateurs.

D'un point de vue organisationnel, la littérature soulève que le risque élevé lié à l'adoption de technologies non éprouvées, le manque de relations de confiance, les systèmes de performance et de reconnaissance axés sur l'efficacité et les gains à court terme, ainsi que la participation limitée des employés sont les principaux obstacles à l'innovation. La hiérarchie traditionnelle et les différents niveaux de décision (stratégique, opérationnel et tactique) au sein des minières peuvent parfois entraver l'intégration des nouvelles technologies et des processus. Repenser cette structure organisationnelle peut favoriser une meilleure communication et une meilleure coordination entre les unités opérationnelles et stratégiques, créant ainsi un environnement propice à l'innovation.

Bien que de nombreuses contraintes et barrières limitent l'essor de l'innovation dans l'industrie minière, des incitatifs et facilitateurs à l'innovation existent, ouvrant la voie à une transformation significative au sein de l'industrie : les projets pilotes et la culture d'apprentissage, le partage de savoir interdisciplinaire, la mise en valeur du savoir-faire opérationnel et de nouveaux systèmes de récompenses, la communication et la collaboration aux différents niveaux de l'organisation.

Un autre facteur, qui gagne en importance actuellement et qui peut exercer une influence sur l'adoption d'innovations est l'utilisation accrue des critères ESG (environnementales, sociales et de gouvernance) par les parties prenantes. Étant donné que l'ESG reste le risque et l'opportunité numéro un dans le secteur des mines et des métaux, selon les répondants à l'enquête de EY de 2023 « *Top 10 business risks and opportunities for mining and metals* » (EY, 2023), l'adoption de technologies innovantes pourrait potentiellement permettre au secteur minier de réduire son empreinte environnementale, d'améliorer la sécurité des travailleurs et de répondre aux normes ESG de manière plus proactive. En

effet, la performance extrafinancière des entreprises pourrait être utilisée pour orienter des décisions d'investissement éclairées dans le contexte des projets miniers. Les critères ESG se distinguent des exigences d'une stratégie d'entreprise classique en mettant l'accent sur la durabilité, la responsabilité environnementale, la transparence et la gestion proactive des risques et des opportunités liés à l'environnement, aux aspects sociaux et à la gouvernance. Ils reflètent une approche plus holistique de la gestion de l'entreprise, prenant en compte les enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance comme un élément clé de la création de valeur à long terme. Les critères ESG pourraient donc être perçus comme une opportunité favorisant une rentabilité additionnelle, bien qu'ils ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière actuellement, en particulier parce que les avantages financiers de la divulgation ESG ne sont pas mesurables.

Le tableau suivant permet de synthétiser l'ensemble des éléments de la revue de littérature.

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS DANS LE SECTEUR MINIER AU QUÉBEC
<ul style="list-style-type: none"> Le secteur minier est considéré comme conservateur La taille de l'entreprise a été reconnue comme un obstacle organisationnel, mais aussi comme un atout à l'adoption de l'innovation.
ENJEUX TECHNOLOGIQUES QUI INFLUENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS MINIÈRES
<ul style="list-style-type: none"> Principales technologies émergentes : données et analyse, automatisation, véhicules électriques et alimentés par batterie Potentiel économique significatif à l'intégration de technologies innovantes. Exemple d'avantages compétitifs : <ul style="list-style-type: none"> automatisation : hautement rentable (gain en productivité, réduction MO) électrification : rentable (économie de carburant, réduction besoins en ventilation) technologies numériques : importants bénéfiques, mais difficultés à évaluer les coûts d'acquisition et d'intégration plus difficile d'évaluer impacts ESG (SST, environnementaux et réputationnels)
<ul style="list-style-type: none"> Importance des projets pilotes De nouveaux rapports de force entre les METS et les minières en lien avec la transformation numérique : <ul style="list-style-type: none"> les minières de plus en plus dépendantes de leurs fournisseurs pour leur propre innovation ; compétition pour le contrôle des connaissances architecturales ; enjeu de propriété des données (commun à d'autres secteurs industriels)
CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES INHÉRENTES À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS
<ul style="list-style-type: none"> Les gîtes miniers sont non renouvelables (contraintes sur l'accessibilité et la qualité des gisements => approche d'innovation incrémentale) Les minéraux sont dispersés géographiquement (contraintes importantes liées à l'emplacement des mines en lien avec les fournisseurs de technologies et l'isolement des équipes de travail)

<ul style="list-style-type: none"> • Le cycle minier est intensif en capital • Les étapes du processus de développement minéral sont réalisées en silo et les choix technologiques sont souvent faits au moment de l'étude de faisabilité • Les minières sont dépendantes des prix sur les marchés mondiaux • Le cycle d'exploitation minière a des impacts locaux importants (sur l'environnement et les communautés) => difficultés liées à l'acceptabilité sociale
CONTEXTE ORGANISATIONNEL DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS
<ul style="list-style-type: none"> • L'incertitude et les risques liés aux technologies émergentes non éprouvées dissuadent les investissements • Les compagnies minières sont généralement averses aux pertes et plus particulièrement le niveau opérationnel • Les projets pilotes sont importants pour réduire l'incertitude associée aux technologies innovantes • La culture d'apprentissage et le partage de savoir interdisciplinaire sont importants pour mitiger l'aversion aux pertes • La communication et la collaboration aux différents niveaux de l'organisation sont importantes pour favoriser une culture d'innovation. • Une structure organisationnelle distancée entre les opérations et la direction stratégique (implication limitée des employés dans la prise de décision alors qu'ils ont la charge de la mise en œuvre des technologies sur le site) • Les systèmes de performance et de reconnaissance sont axés sur l'efficacité et l'efficience au détriment de la créativité et l'apprentissage • Un management stratégique qui priorise une approche par projet, centrée sur la rentabilité (l'approche axée sur des projets individuels plutôt qu'une vision globale peut entraver l'innovation à grande échelle, en raison notamment de l'accent mis sur la rentabilité immédiate)
ÉCOSYSTÈME DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS
Gouvernement <ul style="list-style-type: none"> • À travers la réglementation, les incitations financières et la recherche et le développement, ainsi que la formation de la main-d'œuvre
Équipementiers <ul style="list-style-type: none"> • Un changement de paradigme dans la structure de l'innovation minière durant les dernières décennies : une désintégration verticale des grandes entreprises minières et un nouvel écosystème d'innovation alimenté principalement par les METS (« Mining Equipment & Technology suppliers » en anglais) • De nouveaux rapports de force entre les METS et les minières en lien avec la transformation numérique (dynamique de concurrence élargie, dépendance des minières aux fournisseurs, compétition pour le contrôle des connaissances, propriété des données) • Un environnement d'affaire entre coopération et compétition entre les acteurs de l'écosystème minier
Consultants impliqués dans les rapports techniques NI 43-101 <ul style="list-style-type: none"> • Les prévisions financières et les estimations des coûts dans les rapports présentent une incertitude significative, avec des variations pouvant atteindre entre 30 % et 50 % • Impacts des innovations sur les flux monétaires sont généralement peu détaillés

<p>Investisseurs</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une simulation financière qui montre une rentabilité potentielle de l'implantation de technologies de pointe • Un choc d'arrêt de production qui augmente le délai de récupération du capital à un peu plus de 2 ans • Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière
<p>UN CONTEXTE ESG QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière. • Il n'y a pas de consensus scientifique sur les liens à faire entre une bonne performance ESG et une bonne performance financière. • L'influence du prix des commodités sur l'opportunité d'exploiter des gisements jusqu'alors non rentables pourrait engendrer des impacts sur les facteurs ESG. • En dépit de l'importance croissante des critères ESG pour diverses parties prenantes au-delà des investisseurs, il reste une incertitude entourant les incitatifs pour les entreprises minières à adopter des pratiques ESG robustes. • Les avantages financiers de la divulgation ESG ne sont pas mesurables. • Une question se pose sur le degré de préparation et l'approche du secteur minier québécois face à l'augmentation de la demande de transparence. • Il y a une nécessité d'aligner les stratégies et opérations du secteur minier avec les exigences ESG et d'examiner comment cela influe sur les décisions d'investissement, les stratégies d'innovation et les futures méthodes de travail.

Dans l'ensemble, l'industrie minière est à un tournant crucial de son évolution, où l'innovation est non seulement nécessaire, mais aussi possible grâce à des incitatifs. En embrassant la coopération, la culture d'apprentissage, la communication et la valorisation des compétences internes, les minières peuvent se positionner avantageusement dans cette ère de l'industrie 4.0, où les METS jouent un rôle central dans la redéfinition des dynamiques de pouvoir et la promotion de solutions innovantes.

VOLET 2

**CONSULTATION DES ACTEURS DU
SECTEUR MINIER SUR LES
OBSTACLES ET LES INCITATIFS À
L'ADOPTION DES INNOVATIONS
DANS LE SECTEUR**

7 Objectifs et méthodologie de la consultation auprès des acteurs du secteur minier québécois

7.1 Objectifs de la consultation des acteurs du secteur minier

Dans le cadre de notre méthodologie de recherche et afin de compléter les analyses de l'ensemble des chapitres qui viennent d'être exposés, nous avons procédé à une **série d'entrevues auprès de divers intervenants œuvrant au sein de l'écosystème minier québécois** et - pour quelques exceptions - canadien. Il s'agissait de collecter les perceptions et pratiques d'un large éventail d'expertises de terrain de l'écosystème minier québécois.

Ces entretiens ont revêtu une importance capitale à plusieurs égards.

- Ils ont joué un rôle essentiel en confirmant, en réfutant ou tout du moins en nuancant, pour le contexte québécois, les tendances relevées dans la recension des écrits sur les dynamiques entourant les décisions d'investir dans des innovations et sur la prise en compte des critères ESG dans le secteur minier, et plus précisément dans l'exploitation minière.
- Ils ont également contribué à mettre en lumière les points de convergence ou de divergence entre les divers acteurs du secteur et à aborder les questions en suspens tout en dissipant lorsque possible les zones d'incertitude.
- D'autre part, les entretiens ont permis d'actualiser les constats issus de la littérature, qui se réfèrent généralement à des informations remontant le plus souvent jusqu'en 2021. Cela était d'autant plus vital compte tenu des changements significatifs survenus ces dernières années dans le domaine des technologies innovantes et du fait que l'industrie semble se mobiliser très rapidement avec une courbe d'apprentissage très rapide.
- Ainsi, ces entretiens ont facilité la mise à jour des constatations en s'appuyant sur les données les plus récentes disponibles.

Afin de consolider nos compréhensions et de rencontrer sur place des professionnels de l'écosystème minier, nous avons également participé à des événements reliés au secteur minier incluant :

- l'événement public « Mining and Biodiversity » du 1^{er} juin 2023 organisé par Millani et l'Association minière du Canada ;
- l'École d'été sur le thème de la « Mine intelligente et Autonome » à Polytechnique Montréal en août 2023 ;

- l'atelier thématique du 6 septembre 2023 portant sur les principes ESG et l'économie circulaire à l'initiative du Réseau de recherche propre aux minéraux critiques et stratégique (MCS) du Consortium de Recherche et d'Innovation en Transformation Métallique (CRITM).

7.2 Méthodologie de la consultation des acteurs du secteur minier

Nous avons joint un éventail d'experts relié à l'industrie minière le plus large possible, incluant les **sociétés d'exploitation minières**, les **équipementiers**, les **investisseurs**, les **consultants**, les **chercheurs universitaires**, et des **experts gouvernementaux** (voir tableau 6).

Nous avons obtenu ces contacts de différentes manières : certains nous ont été fournis par le Groupe MISA, d'autres font partie du réseau professionnel des membres de l'équipe, d'autres ont été rencontrés dans le cadre de nos participations à des événements et plusieurs nous ont été recommandés au cours de nos entrevues.

Plus précisément, nous avons donc eu des rencontres avec des personnes à haute responsabilité d'entreprises minières, des dirigeants d'entreprises développant des équipements et des solutions technologiques de pointe au Québec, et des investisseurs situés au Québec, en Ontario et en Colombie-Britannique, principalement des analystes et gestionnaires de fonds d'investissements et d'institutions bancaires pour leur expertise dans le financement de projets miniers et l'analyse financière de compagnies minières et dans les critères ESG.

De plus, nous avons aussi échangé avec des chercheurs universitaires, y compris des professeurs et des étudiants de doctorat, des experts gouvernementaux impliqués dans l'élaboration de politiques publiques liées à l'industrie minière, ainsi que des consultants, impliqués notamment de près ou de loin dans la rédaction des rapports NI43-101.

La composition de notre **échantillon de répondants pour les entrevues a été suffisamment diversifiée** pour représenter l'ensemble des sous-secteurs de l'écosystème et permettre d'en relever et d'en comprendre les principales problématiques. La taille de l'échantillon n'a pas été prédéfinie, mais a été déterminée en fonction des tendances qui ressortaient de nos entretiens. En conséquence, **l'échantillonnage des participants à cette étude qualitative s'est terminé suivant le principe de saturation**, c'est-à-dire lorsque des schémas répétitifs ont commencé à apparaître et que l'introduction de nouvelles sources ne contribuait plus à augmenter le niveau de connaissances et à enrichir la compréhension (Bowen, 2008).

Tableau 6. Liste détaillée des profils de répondants

CATÉGORIES DE PROFILS	TYPES D'ORGANISATIONS	DOMAINE PROFESSIONNEL OU DÉPARTEMENT DES RÉPONDANTS
Société d'exploitation minière	Grands groupes internationaux	<ul style="list-style-type: none"> • Direction durabilité • Directeur changements climatiques
	Minières québécoises	<ul style="list-style-type: none"> • Président Directeur général • Vice-présidence aux opérations
Équipementier	Fournisseurs d'équipements	<ul style="list-style-type: none"> • Président Directeur général • VP finances
	Développeurs de solution	<ul style="list-style-type: none"> • Chef d'équipe IA
Conseil	Firmes de consultation	<ul style="list-style-type: none"> • Consultant mines • Direction régionale • Vice-présidence exécutive
Investisseur	Grands investisseurs institutionnels du Québec (CDPQ, Fonds de Solidarité FTQ)	<ul style="list-style-type: none"> • Directeur principal, Mines et matériaux • Placements privés et investissements d'impact
	Gestionnaire de fonds	<ul style="list-style-type: none"> • Direction investissements durables
	Institution bancaire	<ul style="list-style-type: none"> • Analystes de compagnies minières
Recherche Gouvernement Association (RGA)	École d'ingénieurs	<ul style="list-style-type: none"> • Professeurs en génie minier • Doctorant
	Gouvernement du Québec	<ul style="list-style-type: none"> • Politiques minières
	Association minière	<ul style="list-style-type: none"> • Présidence

Au total, 30 personnes de 21 organisations ont été rencontrées, comme cela est indiqué dans le

Tableau7. Menées principalement par visioconférence entre mai et septembre 2023, ces discussions nous ont permis de collecter de nombreux éléments d'analyse et de réflexion pour nos questions de recherches relatives d'une part aux facteurs expliquant ou infirmant le conservatisme observé du côté des entreprises minières en ce qui a trait à l'adoption de technologies innovantes dans leurs projets d'investissements, d'autre part à la prise en compte des critères ESG dans leurs décisions d'investissement.

Afin de garantir la confidentialité des échanges avec les participants, nous leur avons fait signer, préalablement aux entrevues, un formulaire d'information et de consentement leur expliquant que la recherche était encadrée par un certificat de conformité éthique émis par le Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal. De plus, en

raison du nombre plus restreint de chercheurs, d'experts gouvernementaux et d'interlocuteurs d'associations minières rencontrés, nous les avons regroupés en un seul ensemble appelé « Recherche/Gouvernement/Association » (RGA), dans le but de préserver la confidentialité de nos entretiens avec ces profils. Nos interlocuteurs ont donc été classifiés en cinq catégories distinctes, comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 7. Tableau récapitulatif des entretiens menés dans le cadre de ce projet de mai à septembre 2023

ENTREVUES MENÉES MAI – SEPTEMBRE 2023	NOMBRE D'ENTRETIENS	NOMBRE D'ORGANISATIONS	NOMBRE DE PERSONNES
Minières	7	7	10
Équipementiers	3	3	4
Conseils	4	3	4
Investisseurs	4	4	6
Recherche/Gouvernement/Association (RGA)	5	4	6
TOTAL	23	21	30

Les entrevues ont été basées sur un guide d'entrevues construit au départ sur la base de la revue de littérature, bonifié au fur et à mesure de l'avancement de la recherche documentaire, de l'analyse des rapports NI 43-101, et du retour d'expérience de nos entretiens. Le guide se retrouve à l'annexe 14.5. Il a servi de fil conducteur à nos discussions, mais nous avons mené nos entretiens avec flexibilité en fonction du profil, du champ d'expertise et de l'expérience de l'interlocuteur, mais également en fonction d'éléments additionnels ressortis au cours des conversations et que nous avons jugé instructifs.

7.3 Présentation des résultats

Nous faisons ici une synthèse des propos des professionnels et experts consultés, sans ajout ni commentaire de notre part. La structure suivie reprend les différents volets définis dans la revue de la littérature de ce rapport à savoir :

- quelques généralités sur l'adoption d'innovations dans le secteur minier au Québec ;
- enjeux technologiques qui influencent l'adoption d'innovations ;
- caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière qui influencent l'adoption d'innovations ;

- contexte organisationnel de l'industrie minière qui influence l'adoption d'innovations ;
- écosystème de l'industrie minière qui influence l'adoption d'innovations;
- un contexte ESG qui influence l'adoption d'innovations.

Dans chacun de ces volets, les éléments restitués s'appliquent aux réalités perçues pour l'industrie minière québécoise et ont été classés par thématiques. Il ne s'agit pas ici de fournir des détails trop techniques sur des applications technologiques particulières, notre focus étant de nous concentrer davantage sur les grandes dynamiques en matière d'adoption de technologies d'innovation et de pratiques ESG.

Plusieurs des facteurs identifiés peuvent être à la fois des obstacles et des incitatifs à l'innovation, selon leur absence ou leur présence. Par exemple, l'échange d'idées et les retombées de connaissances entre différentes parties prenantes peuvent favoriser la diffusion de l'innovation, tandis qu'un manque de transmission des connaissances et une asymétrie de l'information peuvent constituer un obstacle à l'innovation.

Cette présentation des faits saillants s'inspire de la méthodologie suivie par Ediriweera & Wiewiora (2021) pour analyser les résultats d'une consultation de même nature qu'ils ont réalisée. Les éléments de cette section ont ainsi été anonymisés, sans attribution des propos à leurs auteurs ni divulgation des noms de personnes ou d'entreprises ayant pu être cités au cours des conversations. En revanche, nous précisons pour chacune des idées retranscrites le profil ou les profils des répondants qui en sont à l'origine. Considérant le nombre limité d'interlocuteurs dans les catégories de répondants, nous choisissons également de ne faire figurer aucune citation dans le texte.

Le Tableau 8 présente une synthèse de ce qui va être présenté dans cette section en comparant ainsi les éléments issus de la littérature et ceux provenant des entrevues.

Tableau 8 : Comparaison synthétique de la revue des écrits et des entrevues

REVUE DE LITTÉRATURE	FAITS SAILLANTS ISSUS DES ENTREVUES
GÉNÉRALITÉS SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS DANS LE SECTEUR MINIER AU QUÉBEC	
<ul style="list-style-type: none"> • Le secteur minier est considéré comme conservateur • La taille de l'entreprise a été reconnue comme un obstacle organisationnel, mais aussi comme un atout à l'adoption de l'innovation. 	<p>Un consensus sur l'adoption de l'innovation dans le secteur minier</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un secteur minier très conservateur • Un besoin de rentabilité à la hauteur des investissements <p>Quelques différences dans l'adoption de l'innovation selon le type et la taille de la mine et selon le minerai</p>
ENJEUX TECHNOLOGIQUES QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS	
<ul style="list-style-type: none"> • Principales technologies émergentes : données et analyse, automatisation, véhicules électriques et alimentés par batterie 	<ul style="list-style-type: none"> • Principales technologies émergentes : automatisation, transition numérique, véhicules électriques

<ul style="list-style-type: none"> • Potentiel économique significatif à l'intégration de technologies innovantes. Exemple d'avantages compétitifs : <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation : hautement rentable (gain en productivité, réduction MO) • Électrification : rentable (économie de carburant, réduction besoins en ventilation) • Technologies numériques : importants bénéfiques, mais difficultés à évaluer les coûts d'acquisition et d'intégration • Plus difficile d'évaluer impacts ESG (SST, environnementaux et réputationnel) 	<ul style="list-style-type: none"> • Un consensus sur les bénéfices opérationnels apportés par les technologies innovantes
<ul style="list-style-type: none"> • Importance des projets pilotes • De nouveaux rapports de force entre les METS et les minières en lien avec la transformation numérique <ul style="list-style-type: none"> • les minières de plus en plus dépendantes de leurs fournisseurs pour leur propre innovation • Compétition pour le contrôle des connaissances architecturales (architectural knowledge) • enjeu de propriété des données (commun à d'autres secteurs industriels) 	<ul style="list-style-type: none"> • Un besoin pour des tests pilotes <p>Défis et enjeux technologiques à l'adoption de l'innovation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des enjeux d'interopérabilité • Des enjeux quant à la propriété des données
CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES INHÉRENTES À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS	
<ul style="list-style-type: none"> • Les gîtes miniers sont non renouvelables (contraintes sur l'accessibilité et la qualité des gisements => approche d'innovation incrémentale) • Les minéraux sont dispersés géographiquement (contraintes importantes liées à l'emplacement des mines en lien avec les fournisseurs de technologies et l'isolement des équipes de travail) • Le cycle minier est intensif en capital • Les étapes du processus de développement minéral sont réalisées en silo et les choix technologiques sont souvent faits au moment de l'étude de faisabilité • Les minières sont dépendantes des prix sur les marchés mondiaux • Le cycle d'exploitation minière a des impacts locaux importants (sur l'environnement et les communautés) => difficultés liées à l'acceptabilité sociale 	<p>Autres défis et enjeux pour l'adoption de l'innovation en lien avec les caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière (N)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des enjeux de disponibilités rapides des véhicules électriques • Des enjeux d'accès à de l'électricité verte • Des enjeux reliés à l'éloignement géographique • Des enjeux géologiques pouvant exercer une influence sur l'adoption d'innovation • L'influence du prix des commodités sur l'innovation

CONTEXTE ORGANISATIONNEL DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS	
<ul style="list-style-type: none"> • L'incertitude et les risques liés aux technologies émergentes non éprouvées dissuadent les investissements • Les compagnies minières sont généralement averses aux pertes et plus particulièrement le niveau opérationnel • Les projets pilotes sont importants pour réduire l'incertitude associée aux technologies innovantes • La culture d'apprentissage et le partage de savoir interdisciplinaire sont importants pour mitiger l'aversion aux pertes • La communication et la collaboration aux différents niveaux de l'organisation sont importantes pour favoriser une culture d'innovation • Une structure organisationnelle distancée entre les opérations et la direction stratégique (implication limitée des employés dans la prise de décision alors qu'ils ont la charge de la mise en œuvre des technologies sur le site) • Les systèmes de performance et de reconnaissance sont axés sur l'efficacité et l'efficience au détriment de la créativité et l'apprentissage • Un management stratégique qui priorise une approche par projet, centrée sur la rentabilité (l'approche axée sur des projets individuels plutôt qu'une vision globale peut entraver l'innovation à grande échelle, en raison notamment de l'accent mis sur la rentabilité immédiate.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Des incertitudes perçues par les minières quant à la rentabilité de certaines technologies émergentes • Une aversion aux pertes manifeste dans l'industrie minière au Québec • Des décisions prises à plusieurs niveaux de la chaîne décisionnelle • Une intégration nécessaire des opérations dans la prise de décision pour garantir l'acceptation d'une technologie innovante • Une résistance aux changements de la part des équipes opérationnelles • Une plus grande diversité de parcours professionnels au sein des CA influençant l'adoption de l'innovation (N) • Une structure organisationnelle avec peu d'externalisation (N) <p>Autres défis et enjeux pour l'adoption de l'innovation en lien avec les ressources humaines dans l'industrie minière (N)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Enjeux liés à une main-d'œuvre vieillissante : difficulté liée au transfert de connaissance et résistance aux changements ▪ Enjeux de rétention de la main-d'œuvre ▪ Besoin de formation aux nouvelles technologies pour augmenter leur acceptabilité ▪ Enjeux d'attraction de main-d'œuvre ▪ De nouvelles compétences recherchées, mais en concurrence avec d'autres secteurs industriels et d'autres pays ▪ Un besoin de connaissance et de compétence à l'interne comme prérequis à l'adoption d'innovations
ÉCOSYSTÈME DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS	
<p>Gouvernement</p> <ul style="list-style-type: none"> • À travers la réglementation, les incitations financières et la recherche et le développement ainsi que la formation de la main-d'œuvre. 	<p>Gouvernement</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des programmes gouvernementaux pour stimuler l'innovation • Une nécessité d'aligner les cadres réglementaires avec les avancées technologiques • Une harmonisation des réglementations pour stimuler l'innovation

	<ul style="list-style-type: none"> • Une protection des idées par des brevets pour stimuler l'innovation
Équipementiers <ul style="list-style-type: none"> • Un changement de paradigme dans la structure de l'innovation minière durant les dernières décennies : une désintégration verticale des grandes entreprises minières et un nouvel écosystème d'innovation alimenté principalement par les METS (Mining Equipment & Technology suppliers) • De nouveaux rapports de force entre les METS et les minières en lien avec la transformation numérique (dynamique de concurrence élargie, dépendance des minières aux fournisseurs, compétition pour le contrôle des connaissances, propriété des données) 	Équipementiers Confirmation des tendances de la littérature
Consultants impliqués dans les rapports techniques NI 43-101 <ul style="list-style-type: none"> • Les prévisions financières et les estimations des coûts dans les rapports présentent une incertitude significative, avec des variations pouvant atteindre entre 30 % et 50 % ; • Impacts des innovations sur les flux monétaires sont généralement peu détaillés ; 	Consultants impliqués dans les rapports techniques NI 43-101
Investisseurs <ul style="list-style-type: none"> • Une simulation financière qui montre une rentabilité potentielle de l'implantation de technologies de pointe • Un choc d'arrêt de production qui augmente le délai de récupération du capital à un peu plus de 2 ans. • Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière 	Investisseurs <ul style="list-style-type: none"> • Des financements différenciés en fonction des objectifs spécifiques de chaque investisseur • Des décisions d'investissement prises selon certaines caractéristiques propres à l'innovation
<ul style="list-style-type: none"> • Une coopération nécessaire entre tous les acteurs de l'écosystème minier pour faciliter l'adoption d'innovations 	Un besoin de collaboration sur toute la chaîne et avec tous les acteurs du secteur minier
UN CONTEXTE ESG QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS	
<ul style="list-style-type: none"> • Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière. • Il n'y a pas de consensus scientifique sur les liens à faire entre une bonne performance ESG et une bonne performance financière. • L'influence du prix des commodités sur l'opportunité d'exploiter des gisements jusqu'alors non rentables pourrait engendrer des impacts sur les facteurs ESG. • En dépit de l'importance croissante des critères ESG pour diverses parties prenantes au-delà des investisseurs, il reste une incertitude entourant les incitatifs pour les entreprises minières à adopter des pratiques ESG robustes. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'impact environnemental des opérations et la responsabilité sociale des entreprises deviennent des critères considérés par les investisseurs, bien que l'aspect ESG n'a pas encore la priorité sur la rentabilité financière d'un projet. • La conscience des enjeux ESG se renforce au sein des compagnies minières. • L'écosystème influence beaucoup l'adoption des facteurs ESG pour l'ensemble des acteurs. • C'est un défi de collecter les données ESG auprès de toutes les équipes au sein d'une mine.

<ul style="list-style-type: none"> • Les avantages financiers de la divulgation ESG ne sont pas mesurables. • Une question se pose sur le degré de préparation et l'approche du secteur minier québécois face à l'augmentation de la demande de transparence. • Il y a une nécessité d'aligner les stratégies et opérations du secteur minier avec les exigences ESG et d'examiner comment cela influe sur les décisions d'investissement, les stratégies d'innovation et les futures méthodes de travail. 	<ul style="list-style-type: none"> • La déclinaison des facteurs ESG du point de vue opérationnel constitue de nouveaux efforts à entreprendre. • Il paraît clair que les innovations en développement ne se feront qu'en respectant les engagements ESG et dans le but d'améliorer la performance extrafinancière des entreprises.
---	---

7.4 Synthèse des hypothèses issues de la revue de littérature à confirmer lors des entrevues

À la lumière de nos observations dans la revue de la littérature, plusieurs hypothèses ont été formulées dans les sections précédentes pour tenter d'expliquer pourquoi le secteur minier hésite à investir pleinement dans des technologies disruptives, malgré leur rentabilité potentielle. Voici les principales hypothèses que nous allons tenter de valider à travers les entrevues qui complètent les nombreux constats du tableau bilan du précédent chapitre :

1. L'incertitude liée aux technologies émergentes dissuade les investissements.
2. L'approche axée sur des projets individuels plutôt qu'une vision globale peut entraver l'innovation à grande échelle, en raison notamment de l'accent mis sur la rentabilité immédiate.
3. La réticence de l'industrie minière d'investir dans des technologies de pointe tient à une aversion aux pertes prononcée qui occulte les gains potentiels.
4. Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière.
 - Il n'y a pas de consensus scientifique sur les liens à faire entre une bonne performance ESG et une bonne performance financière.
 - L'influence du prix des commodités sur l'opportunité d'exploiter des gisements jusqu'alors non rentables pourrait engendrer des impacts sur les facteurs ESG.
 - En dépit de l'importance croissante des critères ESG pour diverses parties prenantes au-delà des investisseurs, il reste une incertitude entourant les incitatifs pour les entreprises minières à adopter des pratiques ESG robustes.
 - Les avantages financiers de la divulgation ESG ne sont pas mesurables.
 - Une question se pose sur le degré de préparation et l'approche du secteur minier québécois face à l'augmentation de la demande de transparence.

- Il y a une nécessité d'aligner les stratégies et opérations du secteur minier avec les exigences ESG et d'examiner comment cela influe sur les décisions d'investissement, les stratégies d'innovation et les futures méthodes de travail.

8 Faits saillants des entrevues sur les généralités et les enjeux technologiques qui influencent l'adoption d'innovations dans le secteur minier au Québec

Nos entrevues ont fait ressortir des consensus venant confirmer les points que nous avons observés, mais ont aussi apporté des éléments nouveaux. Plus précisément, certaines différences et nuances sont apparues en fonction des profils de personnes interrogées (minières, investisseurs, etc.), mais aussi suivant le minerai, la taille de la mine ou suivant qu'il s'agisse d'un nouveau projet ou non.

Nous débutons en présentant un aperçu des propos et perceptions des personnes interrogées en lien avec le niveau d'adoption des innovations au Québec (et au Canada dans son ensemble) afin de brosser un portrait de la situation actuelle et positionner la province et le pays par rapport à d'autres zones géographiques.

De manière générale, certains de nos répondants ont indiqué que par rapport à d'autres secteurs d'activité plus avancés technologiquement, les mines tentent de rattraper un retard accumulé d'une décennie dans le domaine de l'automatisation (*Conseil, Investisseur*). Comme précisé par un consultant, les entreprises minières au Québec présenteraient un retard technologique par rapport à leurs concurrentes opérant dans d'autres pays, en particulier l'Australie et l'Afrique du Sud (*Conseil*). Selon un répondant de l'industrie minière, ce retard relatif du Québec en matière d'adoption des innovations serait dû en grande partie à l'existence de mécanismes, de structures et de processus bien établis et difficilement modifiables au sein des opérations actuelles des minières (*Minière*).

À l'inverse et selon un autre point de vue, le niveau technologique au Québec ne présente généralement pas de retard ni d'avance significative par rapport à d'autres régions du monde, que ce soit au Canada, aux États-Unis ou ailleurs. Le monde minier, relativement petit, est très interconnecté, avec des professionnels travaillant dans diverses organisations et établissant des liens lors de conférences. Les compagnies minières sont également très familières les unes avec les autres. Ainsi, les processus et les méthodes utilisés dans l'industrie minière au Québec sont souvent similaires à ceux employés en Australie, en Amérique du Sud ou ailleurs (*Investisseur*).

Tant les chercheurs que les sociétés minières présentes au Québec sont particulièrement attentifs aux pratiques existantes dans leur domaine d'intérêt, en observant également ce qui se fait ailleurs, cherchant à optimiser leur processus en termes de rapidité d'adaptation (*RGA*). L'industrie minière québécoise entretient une collaboration fructueuse avec son homologue australienne, notamment en raison d'une proximité

culturelle qui facilite le travail en commun. Les Australiens, malgré la barrière de la langue, partageraient une approche similaire aux Québécois concernant le développement des mines et les relations interpersonnelles, ce qui contribuerait grandement à la réussite de la coopération (RGA). De son côté, le Gouvernement du Québec dans ses politiques publiques dédiées à l'industrie minière est aussi attentif à ce qui se pratique ailleurs, et favorise l'intégration de nouvelles approches et technologies lorsqu'elles sont déjà éprouvées, tout en se montrant aussi ouvert au développement de solutions inédites. Il étudie le fonctionnement d'innovations implémentées en Australie, notamment en fonction du contexte climatique nordique québécois, des particularités de fonctionnement locales et des règles environnementales, de santé et de sécurité en vigueur (RGA). Le MRNF participe d'ailleurs activement à divers comités internationaux, incluant le Royaume-Uni. Il est notamment impliqué dans l'initiative IRMA et est en collaboration avec *EIT Raw Materials* (RGA).

Pour ce qui est du Canada dans son ensemble, il nous a été indiqué que le pays a dû au cours des dernières années rattraper un retard en matière d'innovation par rapport à d'autres pays tels que l'Australie. Il y avait certains défis à rassembler l'industrie minière et collaborer sur l'innovation. Le financement de l'innovation minière par le gouvernement n'était pas très encouragé, et la demande d'une supergrappe d'innovation pour le secteur minier ne s'est pas concrétisée. L'industrie minière canadienne a, dès lors, réalisé qu'elle devait adopter une approche plus coordonnée. Cela a conduit à un ralliement autour du Conseil canadien de l'innovation minière pour soutenir l'innovation à l'échelle nationale (RGA).

8.1 Un consensus sur l'adoption de l'innovation dans le secteur minier

8.1.1 Un secteur minier très conservateur

Tout comme la littérature faisait mention du fait que le secteur minier est plutôt considéré comme ayant une culture conservatrice, de l'avis général des participants à nos entrevues, les entreprises minières **préfèrent généralement ne pas être les premières** à mettre en œuvre de nouvelles technologies. Le conservatisme observé en matière d'innovations au sein du secteur minier s'expliquerait donc par une approche attentiste en ce qui a trait à l'adoption de nouvelles technologies. En effet, les entreprises minières ne sont pas réellement réticentes à l'adoption de nouvelles technologies, mais ont tendance en premier lieu à observer ce que font les autres (RGA, *Investisseur, Minière*). Elles veulent avant tout éviter de prendre des risques importants, ce qui limite l'adoption de nouvelles technologies innovantes (*Investisseur*). En effet, le risque financier a un poids déterminant sur l'ensemble d'un projet minier, considérant que des investissements se chiffrant parfois

à plusieurs centaines de millions de dollars peuvent être engagés (*RGA*). De plus, les incertitudes de la conjoncture économique peuvent amener à la réévaluation de projets et mener à une reconsidération des décisions d'investir dans de nouvelles technologies (*Conseil*).

La volonté d'innover et la mise en œuvre de nouvelles technologies dépendent aussi largement de la direction de chaque mine. Certaines directions sont plus ouvertes à l'expérimentation de nouvelles idées et à l'adoption d'innovations, tandis que d'autres sont plus prudentes pour ne pas dire conservatrices (*Investisseur*). Plusieurs nous ont mentionné le fait que bien que des changements s'opèrent au sein des minières, la majorité d'entre elles sont dirigées par des professionnels expérimentés habitués à des méthodes et des pratiques de travail qui ont fait leurs preuves depuis de nombreuses années. Convaincre ces professionnels de faire évoluer leurs habitudes peut représenter un défi (*Investisseur, Minière*).

8.1.2 Un besoin de rentabilité à la hauteur des investissements

Nos entretiens confirment que la rentabilité joue un rôle très important lorsqu'il s'agit de déployer de nouvelles technologies. **En effet, la rentabilité de la technologie est, de l'avis général, primordiale et doit se mesurer à la hauteur du niveau d'investissements consacrés.** Les incertitudes sont nombreuses tant au démarrage qu'en phase d'exploitation et occultent donc les bénéfices potentiels permis par l'innovation (*RGA, Équipementier*). Néanmoins, les minières sont conscientes des changements à effectuer et ont commencé à entreprendre des actions dans ce sens au cours des dernières années (*RGA*).

L'innovation doit amener un gain de productivité, soit par une réduction du coût de la tonne ou par une augmentation du nombre de tonnes pour le même coût, et un gain financier tangible à la fin (*Minière*). Un consultant indique, sur ce point, qu'une analyse coût-bénéfice sur une période déterminée doit être effectuée pour démontrer la rentabilité et la valeur ajoutée de tout projet d'adoption de technologies d'innovation. Cette analyse doit aussi aller au-delà de la seule optimisation technologique, en tenant aussi compte des impacts au sein de l'organisation et des considérations sociétales. Une approche stratégique flexible, qui anticipe les évolutions réglementaires notamment environnementales, ajoute de la valeur au projet, mais la quantification de cette valeur reste complexe (*Conseil*). La soumission de projets de recherche aux entreprises minières doit donc faire la démonstration de résultats tangibles et rapides. La durée limitée de vie

des mines les pousse à exiger des retours plus rapides. Par conséquent, pour les convaincre d'investir dans ces projets, il est important de leur offrir des avantages ou des gains à court terme, généralement dans un délai d'un ou deux ans (*RGA*). Un investisseur ajoute que si l'innovation peut être testée sur un petit chantier sans perturber considérablement les opérations de la mine, l'entreprise sera probablement ouverte à l'adopter, en particulier si des avantages y sont identifiés (*Investisseur*).

La recherche de solutions novatrices est généralement motivée par le besoin de répondre aux défis posés par l'extraction du minerai d'une part, et d'améliorer les pratiques environnementales et opérationnelles d'autre part. Les décisions d'innovation sont influencées par plusieurs facteurs, principalement la durée de vie de la mine (*Minière, RGA, Investisseur*), le degré du potentiel offert par la technologie qui sera effectivement intégré dans les opérations (*Minière*), les contraintes budgétaires (*Minière*), les considérations climatiques du site et l'environnement réglementaire qui est plus ou moins réceptif aux nouvelles technologies (*Minière, RGA*). Mais généralement, bien qu'elles souhaitent que l'industrie minière dans son ensemble tire parti des derniers progrès technologiques, les compagnies minières ne souhaitent pas être les seules à investir dans la recherche et le développement, et par conséquent peuvent être amenées à freiner leurs dépenses dans ces domaines (*Minière*).

8.2 Quelques différences dans l'adoption de l'innovation selon le type et la taille de la mine et selon le minerai

Certaines nuances viennent compléter la littérature en ce qui concerne des différences suivant le minerai, la taille de la minière ou suivant qu'il s'agisse d'un nouveau projet ou non.

8.2.1 Des différences dans l'adoption de l'innovation selon le type de la mine et son âge

Il semble que les pratiques en matière d'innovation soient différentes en fonction de l'expérience de l'entreprise. Ainsi, selon un investisseur, si les start-ups sont par nature totalement axées sur l'innovation, il semble que les sociétés établies et expérimentées au sein de l'industrie minière québécoise investissent peu ou insuffisamment dans la génération de nouvelles idées ou le développement de nouveaux produits (*Investisseur*). Selon un autre investisseur, bien que l'industrie minière soit généralement conservatrice en termes d'adoption de nouvelles technologies, les nouveaux projets miniers sont plus enclins à utiliser des technologies plus avancées (*Investisseur*).

Parfois, certaines mines en démarrage de taille modeste percevront les technologies innovantes comme un moyen de réaliser un meilleur taux de rendement et une diminution de leurs coûts opérationnels (*Minière*).

8.2.2 Des différences dans l'adoption de l'innovation selon la taille de la mine

Plusieurs participants nous ont rapporté que les grandes entreprises ont généralement plus de moyens pour soutenir et tester des innovations, tandis que les plus petits acteurs auront plus de difficultés à faire adopter leurs idées (*Investisseur, Équipementier*). Pour un investisseur interrogé, il est rare de voir les petites entreprises allouer des budgets de 4 ou 5 % de leur chiffre d'affaires à la recherche et développement. Même avec une équipe dédiée, certaines peuvent rencontrer des difficultés à atteindre leur objectif d'innovation (*Investisseur*).

Même si elles disposent de ressources plus limitées, il nous a été indiqué que les petites entreprises devraient suivre le mouvement de transition numérique. Or, bien que ces dernières reconnaissent l'importance du changement numérique, cette transition sera moins considérée dans le cas des petites mines dont la fin de vie approche rapidement (*RGA*).

8.2.3 Des différences dans l'adoption de l'innovation selon le minerai

Comme rapporté par un consultant, le secteur minier québécois est principalement dominé par l'extraction aurifère depuis de nombreuses années. Grâce à la longue expérience des entreprises minières dans ce minerai, les méthodes d'extraction sont bien établies, efficaces et hautement rentables. Pour d'autres ressources telles que le graphite, le lithium, le nickel, le cuivre et le fer, la technologie devrait jouer un rôle de plus en plus important. Contrairement à l'or, pour lequel les méthodes existantes sont déjà très efficaces, ces autres ressources offrent des opportunités pour développer de nouvelles technologies d'extraction plus avancées et plus performantes (*Conseil*).

L'industrie minière est constamment en quête de rentabilité et de performance accrues, ce qui suscite son intérêt pour l'innovation (*RGA*). Mais comme précisé par un expert minier, à la différence des usines, les mines sont généralement conçues pour une durée de vie limitée, quinze ans par exemple. À cet égard, la situation varie selon la nature des minéraux extraits. Les mines d'or ont des tonnages moins importants, ce qui entraîne des durées de vie de mine relativement courtes. Leur vision à court terme de 7 à 10 ans maximum lors de leur démarrage rend difficile la priorisation des investissements à long terme dans de nouvelles technologies malgré le potentiel économique de celles-ci. En

comparaison, les mines de fer et les gisements bitumineux hors Québec ont souvent des réserves s'étendant sur plusieurs décennies, facilitant ainsi l'intégration rentable de nouvelles technologies (*Minière*).

8.3 Principales technologies innovantes dans les mines au Québec et au Canada

Les technologies principales mentionnées par les participants lors de nos entretiens confirment celles qui avaient été identifiées dans la revue de la littérature.

Sur le plan de l'adoption de technologies d'innovations, l'industrie minière québécoise commence à robotiser certains secteurs par l'introduction de véhicules autonomes et semi-autonomes, et a fait des avancées technologiques notamment dans l'utilisation de capteurs pour collecter des données de transport de ces véhicules et d'autres informations dans les mines (*Conseil, Minière, RGA*). Certaines mines au Québec ont déjà réalisé une transition numérique complète, tandis que d'autres sont en train de suivre le mouvement (*RGA*).

Un exemple d'innovation technologique concerne l'intégration d'une portion d'intelligence artificielle pour une mesure en temps réel de l'impact sonore des activités d'exploitation d'un site minier à ciel ouvert de grande envergure. Ce développement a été initié il y a une quinzaine d'années dans une optique d'acceptabilité sociale et de conformité réglementaire. Des stations de mesure de bruit ont été déployées pour envoyer aux travailleurs des alertes sur leurs téléphones lorsque les niveaux sonores approchaient d'un seuil critique. Les opérations étaient ainsi ajustées pour minimiser le bruit en fonction des mesures reçues (*Conseil*).

Un autre exemple de technologie émergente dans l'industrie minière québécoise est le *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR), utilisé pour le broyage du minerai. Bien que cette technologie existe depuis environ 25 à 30 ans et qu'elle soit déjà largement implantée en Afrique du Sud et en Australie, elle a pris du temps à s'installer au Québec. Lorsqu'ils conçoivent de nouveaux projets, les professionnels de l'industrie minière de la province ont tendance à privilégier les méthodes et les équipements qu'ils connaissent déjà et avec lesquels ils ont été familiarisés dans leurs expériences passées (*RGA*).

Des discussions ont lieu sur le renouvellement des équipements dans les mines, en particulier avec l'introduction des véhicules électriques. Une distinction peut être faite entre les mines à ciel ouvert et les mines souterraines. Dans les premières, les principales innovations technologiques dans le domaine minier au Québec comprennent également l'utilisation de la communication LTE et des véhicules autonomes. Dans les mines

souterraines, les entreprises minières ont également commencé à intégrer ces technologies, mais sont encore confrontées à des défis en matière de communication et de réglementation pour l'intégration de celles-ci (RGA).

8.3.1 Par qui et par quoi sont portées les technologies innovantes ?

Tout comme la littérature avançait qu'il y avait eu une désintégration verticale des grandes entreprises minières et un éclatement de l'écosystème d'innovation qui était maintenant alimenté principalement par les METS, les entrevues viennent confirmer que l'innovation est principalement portée par les équipementiers et fournisseurs de services qui proposent des améliorations pour modifier les équipements. Les capteurs sont de plus en plus utilisés pour permettre une meilleure compréhension de l'entretien préventif ou prédictif des pompes et des machines. Certaines entreprises au Québec se sont aussi spécialisées dans l'analyse d'images, notamment pour les caméras sur les convoyeurs, permettant de mesurer la taille des fragments de roches, et sont reconnues pour leurs compétences dans ce domaine. D'autres travaillent sur le développement de capteurs pour détecter différents minéraux dans le recyclage et le triage des rebuts. Cependant, cette technologie reste encore à un stade embryonnaire au Québec, et des projets de recherche sont en cours pour l'améliorer (RGA).

Les entrevues ont permis de préciser davantage les raisons qui poussent l'industrie minière à innover. Il est apparu lors de nos discussions que depuis une dizaine d'années, un virage semble aussi s'opérer au Québec chez les entreprises minières vers l'utilisation de technologies plus durables et la prise en compte d'autres critères que la productivité dans le choix des investissements. Ce virage est en partie induit par la pression croissante en faveur du développement durable et des pratiques respectueuses de l'environnement. Ce changement est aussi motivé par d'autres facteurs tels que la nécessité de disposer d'une main-d'œuvre qualifiée qui se raréfie, et les nouvelles attentes émanant des parties prenantes et des actionnaires en matière de critères ESG (*Minière*).

En termes d'innovation verte ou de technologies propres, le Canada commence à être reconnu comme un véritable innovateur. Plusieurs exemples en témoignent, tels que la mine souterraine entièrement électrique de Copper Mountain, la mine Diavik de Rio Tinto qui a ouvert la voie aux éoliennes arctiques, ou encore la mine Raglan de Glencore et ses éoliennes qui permettent une réduction de la dépendance au diesel pour sa consommation électrique. À l'étranger également, les entreprises minières canadiennes sont devenues des leaders en matière d'énergie solaire, comme B2Gold qui possède la plus grande capacité solaire privée en Afrique (RGA).

Selon un chercheur, le secteur minier québécois fonctionne de manière distincte et séparée par rapport au reste du Canada, et leurs réseaux respectifs se distinguent par des interactions et échanges limités entre eux aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale. Bien que les Québécois aient de l'expérience internationale, celle-ci se produit souvent dans des contextes où ils se retrouvent avec d'autres Québécois, notamment en Afrique de l'Ouest francophone. On pourrait parler « d'exportation » d'un modèle québécois dans ces régions (RGA).

8.4 Un consensus sur les bénéfices opérationnels apportés par les technologies innovantes

Nos entretiens corroborent les constats de la littérature concernant les avantages liés aux technologies innovantes, ainsi que la capacité de ces technologies à répondre aux principaux défis de l'industrie minière, notamment en ce qui concerne la main-d'œuvre et les préoccupations environnementales.

Les entrevues ont effectivement fait ressortir des consensus sur plusieurs bénéfices opérationnels permis par les nouvelles technologies innovantes, notamment par leur contribution à apporter des réponses à plusieurs problématiques et enjeux :

- Enjeux de décarbonation : dans les mines souterraines, considérant les enjeux de décarbonation, l'innovation technologique passe par l'élimination des véhicules diesel pour des camions électriques (RGA, *Minière*). La transition vers ces équipements pourrait avoir des avantages significatifs en termes de coûts, en réduisant notamment la ventilation nécessaire pour évacuer les gaz nocifs (RGA).

- Enjeux de communication dans les mines souterraines : La communication constitue la principale problématique à résoudre dans les mines souterraines, où parfois les échanges de certaines informations importantes ne se déroulent que lors des changements de quart, lorsque le contremaître remonte à la surface. Les problématiques induites par cet enjeu de communication sont de plusieurs ordres :

- Les problèmes survenant en sous-sol, tels que les pannes du système de pompe ou les bris d'équipements, ne sont pas rapportés de façon optimale, obligeant une révision des priorités et des activités planifiées.
- Certains équipements peuvent être non localisables aisément, retardant parfois le cycle minier de plusieurs heures jusqu'à ce que l'on connaisse le positionnement de l'équipement ou du véhicule en question.
- Des enjeux de prévention et de sécurité des équipes en sous-sol entrent aussi en ligne de compte (*Minière*).

Selon l'avis de plusieurs experts miniers interrogés, la technologie LTE est une évolution majeure pour l'industrie minière, permettant notamment une transmission instantanée des informations essentielles. Cette technologie a été déployée sous terre rappelons-le, à la mine LaRonde en 2018, et constituait une première mondiale dans le secteur minier. Les données de télémétrie de tous les véhicules sous terre, tels que leur volume, leurs activités et leur position, sont dorénavant transmises par LTE (*Minière*). Bien que la plupart des équipementiers aient commencé à collecter des données sur les véhicules depuis un certain temps, la transmission ne pouvait se faire en temps réel, chose que permet dorénavant la technologie LTE. En conséquence, les communications deviennent beaucoup plus efficaces et fluides, améliorant le suivi des activités dans les mines souterraines : positionnement des équipes, optimisation des mouvements de camions et des opérations de chargement (*Minière*). Bien que cela soit difficilement quantifiable, la qualité de la communication via LTE est aussi améliorée et plus précisément l'atténuation du bruit (*Minière*). Cependant, l'implantation d'une mine connectée implique l'installation d'une infrastructure et une révision en profondeur de son organisation (*Minière*).

- Enjeux de main-d'œuvre : l'automatisation des processus peut apporter des réponses à la pénurie de main-d'œuvre et à la nécessité d'attirer les jeunes vers l'industrie minière (*Conseil, Équipementier*). Cependant, malgré une évolution progressive, la transition vers l'automatisation et l'attractivité du travail dans les mines n'ont pas encore atteint un niveau satisfaisant au Québec (*Conseil*).

- Enjeux de sécurité : l'IA et l'analyse prédictive peuvent aider à diminuer le risque d'incendie avec les batteries des véhicules électriques (*Minière*). La technologie LTE a également une importance capitale pour assurer la sécurité des travailleurs, par exemple en permettant de géolocaliser les équipements et les travailleurs sous terre en cas d'incident, ce qui facilite la mise en œuvre précise des protocoles de prévention et d'intervention (*Minière*).

8.5 Des défis et des enjeux technologiques à l'adoption d'innovations

8.5.1 Un besoin pour des tests pilotes

De la même façon que toutes les personnes rencontrées s'accordaient sur le fait que les minières ne veulent jamais être les premières à innover, elles sont aussi unanimes sur le fait que les innovations doivent nécessairement avoir été testées et leur efficacité prouvée avant d'être mises en pratique sur un site minier. Les tests pilotes apparaissent souvent indispensables pour convaincre les entreprises minières et leur donner des preuves concrètes de l'efficacité d'une innovation avant de s'engager. Mais cela constitue un

obstacle majeur pour les équipementiers et développeurs (*Investisseur*). Ces éléments renforcent les constatations de la littérature scientifique selon lesquelles les projets pilotes sont importants pour réduire l'incertitude associée aux technologies innovantes.

Dans les grandes entreprises minières, il peut aussi y avoir des sites plus novateurs que d'autres, lesquels sont souvent utilisés comme références pour tester les innovations. D'après un consultant, une compagnie minière disposant de plusieurs gisements de nature similaire aurait ainsi la possibilité de tester en même temps des innovations différentes dans plusieurs domaines, telles que des véhicules plus ou moins autonomes, divers systèmes de ventilation, en mobilisant plusieurs équipes sur différents projets. Des risques liés à la qualité des produits pourraient cependant survenir. Par ailleurs, il est possible que le manque de financement interne ou externe limite les investissements nécessaires pour ces projets. L'intérêt pour l'innovation est moins limité par des capacités d'expertises que par des contraintes financières, de qualité ou de risques opérationnels (*Conseil*).

La communication est ici cruciale pour repérer et évaluer les technologies en développement ou déjà en place dans certaines mines en vue de leur transfert éventuel pour faire bénéficier d'autres sites de leurs avantages. Dépendamment de la technologie, la durée des tests d'innovation au sein des entreprises minières peut s'établir entre six mois et deux ans (*Minière*).

8.5.2 Des enjeux d'interopérabilité

Certains éléments ont été plus fréquemment observés lors des entretiens par rapport aux informations disponibles dans la littérature en ce qui concerne plus particulièrement les enjeux technologiques. Ainsi, dépendamment des situations, il peut survenir des problèmes d'uniformité des systèmes entre les équipements manufacturiers (*RGA*). Mais ce point est nuancé par un autre répondant, dans la mesure où les équipements utilisés dans les mines au Québec sont généralement les mêmes, bien qu'ils puissent varier en fonction du type de gisement. Dans tous les cas, les mines souterraines ont des équipements similaires, tels que des foreuses et des équipements standardisés fournis par les mêmes fournisseurs (*RGA*).

8.5.3 Des enjeux quant à la propriété des données

La littérature scientifique avait antérieurement souligné les questions liées à la propriété des données, lesquelles ne se limitent pas au secteur minier, particulièrement lors de l'adoption de technologies numériques. Nos entretiens confirment que ces

préoccupations peuvent effectivement constituer un obstacle à l'adoption de technologies, car elles engendrent des inquiétudes concernant la perte d'indépendance ou l'établissement de relations exclusives avec un fournisseur.

En effet, un des freins à l'innovation est que les minières et les équipementiers demandent tous deux à avoir accès aux données collectées par les équipements, mais la propriété des données reste un sujet à clarifier. Par ailleurs, s'il n'y a pas de risques connus associés à la capture, à la transmission et à l'utilisation des données, les risques de cyberattaques ou de manipulation malveillante des véhicules autonomes existent même s'ils sont difficiles à quantifier (RGA). En lien avec ce sujet, un équipementier nous a mentionné les bénéfices permis par l'installation de puces électroniques dans les pompes en termes de maintenance préventive. Pour ces équipementiers, l'accès aux données sur l'historique complet de chaque pompe, notamment le nombre de fois où elle a été utilisée, ses pannes éventuelles et ses vibrations au fil du temps, est primordial pour fournir une meilleure assistance à leurs clients lorsqu'ils amènent une pompe à réparer. Sur cette question, une réflexion est menée sur la possibilité de partager des données sur une plateforme entre petits équipementiers, dans le cadre du projet de financement VORTEX du groupe MISA.¹⁵ Cette collaboration permettrait aux équipementiers plus petits de travailler ensemble et de fournir un service plus complet à l'industrie minière, notamment pour des projets tels que la mine connectée ou la mine du futur (*Équipementier*).

9 Faits saillants des entrevues sur les caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière qui influencent l'adoption d'innovations au Québec

Les entretiens ont mis en lumière des questions qui n'avaient pas été traitées dans la littérature, que ce soit en raison de leur spécificité au Québec ou de leur aspect très récent. Les prochains paragraphes mettront en évidence certains de ces enjeux, notamment ceux liés à la disponibilité des véhicules électriques et aux défis posés par l'expansion des mines dans des zones nordiques et isolées.

¹⁵ Voir : <https://vortex-groupe-misa.com/>

9.1 L'influence du prix des commodités sur l'innovation

La littérature nous a montré que les minières sont généralement dépendantes des prix déterminés sur les marchés mondiaux et que cet aspect particulier des biens produits peut exercer une influence sur l'adoption d'innovation.

Nous avons essayé à travers nos entrevues de déterminer s'il existe un lien de causalité entre la volatilité du prix des produits de base sur les marchés et un éventuel frein à l'adoption de technologies d'innovations au sein de l'industrie minière, mais nos entrevues n'ont pas permis de confirmer clairement ce lien. Quelques observations connexes sont cependant ressorties sur d'autres aspects, avec quelques distinctions suivant les minerais :

- Selon un consultant, les fluctuations des prix des produits de base sont un facteur qui peut justifier l'adoption d'innovations. La demande pour certains produits de base, comme l'or, est généralement stable, tandis que d'autres, comme le graphite, le lithium, le cuivre et le nickel, sont en forte demande en raison de l'évolution des technologies tributaires de ces minerais (*Conseil*).
- Généralement, la tendance observée est que l'industrie minière est amenée à élever les niveaux de production lorsque le prix des produits de base est élevé, favorisant les projets d'investissements. C'est en particulier le cas dans le cuivre, le nickel et les minéraux critiques et stratégiques (*RGAs*). Ce constat peut notamment être mis en relation avec les conclusions d'une publication de Valacchi et coll. (2019).
- Un investisseur indique qu'au sein des entreprises minières, les équipes de production se concentrent sur l'extraction et le traitement rapide de quantités élevées de minéraux, leur priorité étant de répondre à la demande de la direction. Les ingénieurs responsables de l'innovation et de la planification à long terme se heurtent souvent aux équipes de production qui privilégient le rendement immédiat par rapport aux initiatives d'amélioration durables. Lorsque les prix des produits de base augmentent, la priorité est mise sur la production. Certains opérateurs se contentent de poursuivre les méthodes éprouvées, ignorant les possibilités d'amélioration, car considérées comme insignifiantes par rapport aux volumes massifs de production et de profit (*Investisseur*).

9.2 Des enjeux de disponibilités rapides des véhicules électriques

La transition vers les véhicules électriques dans les mines au Québec nécessitera un remplacement des équipements existants. Un premier défi de taille, et qui nous a été

rapporté par un interlocuteur de l'industrie minière, provient des équipementiers qui ne sont pas toujours en mesure de fournir de manière immédiate les véhicules électriques. Ce manque de disponibilité compromet sérieusement dès le départ l'objectif d'électrification (*Minière*). Il est envisageable à ce titre que certains équipements usagés soient achetés ou transférés d'une mine à l'autre (*RGA*).

9.3 Des enjeux d'accès et de disponibilité de l'électricité verte

L'accès à l'hydroélectricité et plus particulièrement l'accès à une puissance potentiellement insuffisante à moyen terme n'avait pas été mis en avant dans la littérature, bien que cette problématique commence à gagner en visibilité dans les médias québécois. Certains articles présentent d'ailleurs des exemples d'investissements qui sont transférés vers d'autres provinces en raison du manque de puissance énergétique disponible dans un avenir proche (Dubuc, 2023).

Il est vrai que l'utilisation de véhicules électriques pose des défis liés à l'augmentation de la consommation d'électricité. Certaines mines isolées fonctionnant avec une alimentation diesel ne réaliseront pas nécessairement de réduction des émissions de CO₂ en passant aux véhicules électriques. Elles doivent dès lors envisager différentes options pour produire cette électricité, l'installation d'éoliennes par exemple (*RGA*).

En outre, au Québec, la production d'une électricité économique et principalement d'origine renouvelable est un atout considérable de notre économie, surtout à un moment où les chaînes d'approvisionnement mondiales accordent une attention accrue à l'impact environnemental des processus de production. Cela constitue un avantage concurrentiel significatif, mais en même temps tous les secteurs industriels sont fortement intéressés par cet avantage. Or, on a relevé au cours de nos entrevues une grande inquiétude de certaines minières au sujet de l'accès à de grandes quantités d'énergie décarbonée. En effet, la puissance disponible au Québec pourrait potentiellement devenir insuffisante à moyen terme, mettant en péril l'objectif de transition vers l'électrification total (*Minière*).

Par ailleurs, comme rapporté par un répondant de l'industrie minière, l'implantation des véhicules électriques peut être complexe dans les régions arctiques. Cette technologie, qu'elle soit basée sur des batteries ou des trolleys comme les tramways, n'est pas encore suffisamment mature pour ces zones climatiques. Le dimensionnement de certains équipements peut s'avérer plus difficile que d'autres (*Minière*). Quoi qu'il en soit, l'implantation d'une technologie sur une flotte existante de véhicules sera plus facilement intégrée si la solution proposée est clé en main, accompagnée d'un plan pour la maintenance et d'une formation des mécaniciens chargés de l'entretenir (*Minière*).

9.4 Des enjeux reliés à l'éloignement géographique

L'emplacement géographique d'un site minier, ou plus précisément son isolement peut influencer considérablement la décision d'adopter de nouvelles technologies, dans la mesure où son éloignement par rapport à des centres urbains induit d'abord des facteurs de risques accrus. Dans le cas, par exemple, d'une mine située dans le nord du Québec sans accès routier, les exigences en matière de sécurité des technologies seront plus élevées, et les besoins en entretien définis avec une plus grande précision (RGA).

Enfin, la distance géographique et l'accès limité à l'électricité et à l'utilisation d'énergies renouvelables peuvent également restreindre la viabilité des solutions numériques et des centres de contrôle à distance dans les mines éloignées (RGA).

Un autre défi évoqué concerne l'expansion de sites miniers éloignés et difficilement accessibles. Passer à une échelle supérieure en agrandissant les installations existantes soulève plusieurs problèmes pratiques pour les entreprises minières. Tout d'abord, il y a une préoccupation liée à la consommation électrique, car l'extension d'un site nécessite inévitablement une augmentation de la capacité des génératrices. De plus, le manque d'espace de stockage pour le diesel peut devenir problématique (*Minière*). Selon une autre minière, ces limitations concernent également les services destinés aux travailleurs si les effectifs sur place doivent augmenter. Les installations comme les cuisines ont été conçues avec des capacités limitées. La gestion des ressources en eau représente un autre défi, dans la mesure où la capacité de traitement pour les douches est restreinte (*Minière*).

9.5 Des enjeux géologiques pouvant exercer une influence sur l'adoption d'innovation

Dans le domaine particulier du minerai de fer, un interlocuteur de l'industrie minière nous a rapporté que les gisements très riches ou très proches des centres urbains deviennent de plus en plus rares, ce qui confronte les entreprises minières à des gisements de plus en plus pauvres et complexes. Par conséquent, l'utilisation de nouvelles technologies est devenue nécessaire pour la géologie et la métallurgie dans le traitement du minerai. Auparavant, il était possible d'exploiter facilement des gisements très riches et d'avoir suffisamment d'inventus pour faire fonctionner l'usine et obtenir une production raisonnable, permettant de fait une planification plus approximative. Aujourd'hui, le Québec et le Canada dans son ensemble sont confrontés à une concurrence avec l'Afrique, le Brésil et d'autres pays ayant des normes environnementales et sociales différentes. Au Canada, la main-d'œuvre est plus coûteuse et les normes de santé, de sécurité, ainsi que les attentes des parties prenantes des communautés plus élevées qu'ailleurs. Il est donc désormais essentiel de trouver des moyens de rester compétitif, d'autant plus que les

meilleurs gisements ont déjà été exploités en priorité, et d'être très précis dans la planification pour optimiser l'usine et obtenir une récupération adéquate (*Minière*).

Selon un consultant, les particularités liées au graphite varient selon les territoires et les milieux hydrogéologiques, rendant difficile la standardisation de la production de ce minerai. Chaque site peut nécessiter des adaptations spécifiques et une multitude de configurations en fonction du terrain (*Conseil*).

10 Faits saillants des entrevues sur le contexte organisationnel de l'industrie minière qui influence l'adoption d'innovations au Québec

Les entretiens ont renforcé les conclusions de la littérature concernant l'importance de la structure organisationnelle et surtout décisionnelle des minières qui joue un rôle significatif dans l'innovation en créant une distance entre les opérations et la direction stratégique. L'aversion au risque et aux pertes a également été mentionnée au travers de nos entrevues, tout comme lors de la revue de littérature. Cependant, certains éléments nouveaux ont été identifiés, lesquels n'avaient pas été explorés dans la littérature existante. Cela inclut par exemple l'influence des membres des conseils d'administration.

10.1 Des incertitudes perçues par les minières quant à la rentabilité de certaines technologies émergentes

Nos entretiens ont permis de confirmer l'incertitude autour des technologies émergentes. Les opérateurs miniers sont contraints de prendre des décisions qui limitent au maximum les risques et considéreront l'innovation seulement si elle apporte des réductions significatives des coûts en investissement ou en opération (*RGA*). Sur ce plan, il existe une incertitude quant à la rentabilité de l'automatisation des opérations minières. La durée de vie limitée des mines peut rendre l'automatisation et l'électrification des véhicules peu justifiable en raison de leurs coûts élevés par rapport aux solutions actuelles du marché. Les choix de direction se portent le plus souvent vers des technologies immédiatement disponibles et plus facilement implémentables (*Minière*). Pour les projets d'électrification d'un site minier, la connexion au réseau d'Hydro-Québec représente aussi un élément déterminant. L'électrification entraîne une reconfiguration de la stratégie opérationnelle (*Conseil*). Pour ce qui est de la mine connectée, les gains d'efficacité sont encore très difficiles à mesurer (*Minière*).

10.2 Une aversion aux pertes manifeste dans l'industrie minière au Québec

Apporter des changements à des projets déjà implantés, dont les dépenses d'opérations restent généralement stables au fil des années, est souvent difficile selon les dires d'un consultant rencontré. Bien que des budgets soient dédiés annuellement à des renouvellements et des améliorations des processus, il est compliqué de convaincre la direction d'une entreprise minière de dépenser une somme importante pour reconfigurer une usine lorsque le processus actuel de production de celle-ci est fonctionnel et prouvé.

De nos jours, de nombreuses entreprises semblent préférer utiliser des modèles de production existants, qu'elles ajustent légèrement, tandis que d'autres optent davantage pour la création d'usines de démonstration (*Conseil*).

La décision d'investir dans des technologies d'innovation pendant la durée de vie d'une mine peut entraîner des interruptions de la chaîne de production aux conséquences financières importantes si ces arrêts ne sont pas planifiés. La perte de productivité de la mine est ici le premier enjeu qui entre en considération (*RGA, Minière, Investisseur*). Par ailleurs, l'échec d'une implantation d'innovation aux investissements très élevés peut aussi mettre en péril l'ensemble du projet et entraîner la disparition de l'entreprise (*Conseil, Investisseur, Minière*). **Ces éléments viennent en particulier confirmer l'aversion aux pertes observée au sein des entreprises minières.**

Selon un expert minier cependant, à la lumière de tous ces défis mentionnés, le risque associé au statu quo doit aussi être considéré et évalué, afin de savoir quelles sont les conséquences pour les entreprises minières de poursuivre les anciennes approches, notamment sur les plans de la santé et de la sécurité des employés, de l'environnement et des communautés (*Minière*). Un consultant ajoute que les entreprises commencent à prendre conscience du fait qu'un manque d'investissement dans les processus, la recherche et le développement, ainsi que l'innovation, leur sera préjudiciable et pourrait compromettre leur avenir dans les dix prochaines années faute d'adaptation adéquate aux évolutions du marché (*Conseil*).

10.3 Des décisions prises à plusieurs niveaux de la chaîne décisionnelle

L'adoption de technologies d'innovation se situe à plusieurs niveaux de la chaîne décisionnelle. L'objectif premier d'un gestionnaire de projet minier est la rentabilité de la mine. Avant le démarrage de la mine, toute source de risque supplémentaire ou d'augmentation des coûts est à écarter (*RGA, Minière*). De même, la personne responsable de l'exploitation de la mine cherche à maximiser les profits et à les maintenir au quotidien. Cependant, il arrive parfois qu'elle se retrouve limitée dans ses capacités et cherche alors de nouvelles façons de générer davantage de revenus, et perçoit dès lors l'innovation comme une opportunité (*RGA*). Du côté de la direction, il est important de prendre en compte le fait que celle-ci peut changer après quelques années. L'arrivée d'un nouveau directeur s'accompagne généralement d'un changement d'équipe, ce qui peut avoir pour effet de modifier ou repousser les investissements futurs et ainsi entraîner un réexamen de la feuille de route initiale (*Conseil*).

L'optimisation de la production représente un autre défi. Les responsables doivent jongler entre l'efficacité et la maximisation de la production pour répondre aux besoins fluctuants. Il est difficile d'évaluer les économies réalisées chaque année, car des contraintes opérationnelles peuvent parfois affecter l'efficacité. L'objectif est de maximiser la production en tonnes, même si cela implique de sacrifier parfois l'efficacité (*Minière*).

10.4 Une intégration nécessaire des opérations dans la prise de décision pour garantir l'acceptation d'une technologie innovante

La littérature soulignait fréquemment la participation limitée des employés dans le processus décisionnel, alors qu'ils jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre des technologies sur le terrain. Nos entretiens confirment l'importance d'intégrer les opérations dans le processus de prise de décision afin de garantir l'adhésion à l'innovation. La création d'un projet axé sur une nouvelle technologie doit avant tout découler de la résolution d'un problème spécifique au niveau opérationnel. Comme l'a souligné un des répondants de l'industrie minière, l'identification d'un problème précis en collaboration avec les équipes responsables des opérations est en effet primordiale pour garantir l'acceptation d'une solution technologique sur le site. Ces équipes s'impliquent activement dans le projet, augmentent leur compréhension de la technologie en la testant, et participent à l'intégration de celle-ci dans les opérations (*Minière*). L'adoption de nouvelles technologies doit aussi être accompagnée d'une bonne intégration au milieu des opérations. Pour que les effets de ces nouvelles technologies perdurent, leur mise en place doit être réalisée de manière appropriée, en respectant un certain rythme. Cependant, il est parfois difficile de suivre la cadence rapide à laquelle ces technologies évoluent (*Minière*).

10.5 Une résistance aux changements de la part des équipes opérationnelles

Au sein des entreprises minières, la gestion du changement et la formation sont essentielles pour assurer l'acceptation des nouvelles technologies sur les sites. La vision autour de l'innovation doit, pour ce faire, se concentrer sur la culture de l'entreprise, le personnel et les processus. Les compagnies minières ont aussi besoin de soutien pour planifier leur transformation numérique et prioriser leurs projets (*RGA*). Du côté des compétences, il est essentiel que les sociétés minières juniors intègrent progressivement différents métiers et compétences au fur et à mesure de l'avancement du projet. Selon un chercheur interrogé, la présence d'ingénieurs spécialisés dans les procédés était rare par le passé, généralement limitée aux phases de préféabilité, faisabilité et construction du

projet. De nos jours, ces professionnels interviennent souvent en sous-traitance ou sont embauchés directement par les sociétés juniors dès les premières étapes du travail (RGA).

Pour ce qui est des opérations, il est clairement apparu dans plusieurs de nos discussions que les plus grandes entreprises minières sont souvent organisées en silos, créant un enjeu supplémentaire lorsque des décisions d'intégrer de nouvelles technologies sont prises par les directions. Des résistances internes peuvent survenir au sein de ces organisations, les responsables des opérations se demandant avant tout quel sera l'impact de cette intégration sur les domaines sous leur responsabilité (RGA, *Minière*). Cette résistance est généralement moins marquée pour les nouveaux projets miniers que pour les mines déjà en activité (*Minière*). Par conséquent, certaines entreprises pourraient opter pour le déploiement de technologies autonomes dans certaines mines tout en laissant de côté d'autres sites (RGA).

Les compagnies minières ont avant tout besoin d'une vision claire de la transformation numérique et de soutien pour planifier leur transformation numérique (RGA). L'expérience peut apporter des avantages, mais effectuer des changements au sein d'une multinationale s'avère souvent plus compliqué en raison de l'approbation à obtenir d'un plus grand nombre de parties prenantes, incluant les investisseurs. Une petite entreprise qui n'opérerait qu'une seule mine bénéficie généralement d'une plus grande marge de manœuvre pour prendre des décisions (RGA).

La gestion du changement et la communication entre les différents départements des compagnies minières sont des défis importants (RGA). Dans les multinationales, les différentes entités telles que l'usine de traitement, l'exploitation minière, le management, les ressources humaines, etc., opèrent de manière indépendante. Bien qu'elles soient censées communiquer entre elles, cela se fait généralement à des moments déterminés, ce qui entraîne un manque de communication en temps réel et de collaboration. Une telle situation peut engendrer des problèmes tels que le manque de coordination entre l'usine de traitement et l'exploitation minière, où des décisions importantes, comme passer à la maintenance plutôt que d'extraire de la roche, pourraient être mieux prises avec une communication et une coordination plus efficace (RGA).

10.6 Une plus grande diversité de parcours professionnels au sein des CA influençant l'adoption de l'innovation

Une note positive est ressortie dans nos entretiens en ce qui concerne la vision des dirigeants des entreprises minières pour l'innovation. Il y a une trentaine d'années, les

conseils d'administration des minières étaient principalement constitués de personnes ayant une expérience de travail dans l'industrie minière, plusieurs ayant débuté leur carrière en tant qu'ingénieurs miniers avant de gravir les échelons. La situation a changé aujourd'hui, et les directions sont désormais davantage composées de personnes externes à l'industrie minière, avec des parcours professionnels plus variés. Ce changement a eu des répercussions sur la manière dont la technologie et les opportunités d'innovation sont abordées, ces nouveaux membres dans les directions prenant des décisions plus rationnelles (RGA).

10.7 Une structure organisationnelle avec peu d'externalisation

À la différence de ce qui se pratique au Canada, les grandes compagnies minières australiennes tendent à externaliser l'exploitation minière à des sous-traitants, ce qui réduit leurs risques et favorise l'innovation, comme nous l'a rapporté un équipementier. Au Québec, les compagnies minières exploitent directement les mines, ce qui crée une certaine résistance au changement en raison de la rentabilité déjà établie du secteur minier. Les Australiens semblent aussi avoir une vision plus avant-gardiste de l'industrie minière, avec d'importants investissements en R&D (*Équipementier*).

10.8 Des défis et des enjeux en lien avec les ressources humaines dans l'industrie minière qui influencent l'adoption d'innovations

Les questions liées aux ressources humaines ont été fréquemment soulevées lors de nos discussions sur l'innovation, en particulier lorsque l'on abordait les obstacles à l'innovation. Ces éléments n'étaient pas aussi présents dans la revue de littérature que ce que nous avons constaté au cours de nos entretiens.

10.8.1 Enjeux liés à une main-d'œuvre vieillissante : difficulté liée au transfert de connaissances et résistance aux changements

Le départ à la retraite des employés expérimentés pose également des défis. D'une part, les nouveaux employés doivent assimiler le fonctionnement parfois complexe des équipements existants et les procédés opérationnels établis. D'autre part, la documentation est souvent limitée et les connaissances tacites ne sont pas toujours bien préservées, accentuant les difficultés du transfert de connaissances (*Minière*).

L'âge des travailleurs semble jouer un rôle dans leur acceptation des nouvelles technologies. Certains opérateurs d'équipement, généralement ceux approchant la

soixantaine, peuvent être réticents à suivre une formation pour utiliser de nouveaux équipements, en pensant que cela ne sera pas utile pour leur dernière année de travail. En revanche, les jeunes employés dans la vingtaine, généralement plus familiers avec les nouvelles technologies, seront plus enclins à utiliser des centres de contrôle à distance pour manipuler des machines à partir de leur poste de travail (RGA).

10.8.2 Enjeux de rétention de la main-d'œuvre

Un consultant nous indique que le nombre d'experts spécialisés dans le domaine minier est restreint au Québec. Habituellement, cette industrie attire principalement les jeunes en début de carrière. Par la suite, après environ 10 à 15 ans d'expérience, les travailleurs deviennent moins enthousiastes en raison des déplacements fréquents requis, et le taux de rotation du personnel augmente considérablement. De plus, certains ingénieurs qui évoluent dans ce secteur peuvent aisément se réorienter vers d'autres industries dans les grands centres. L'expérience dans l'industrie minière ouvre en effet des opportunités dans divers domaines, notamment la gestion de projet, et il est courant de rencontrer d'anciens professionnels du secteur minier dans des postes liés à l'aéronautique, par exemple. Le remplacement des profils expérimentés est donc complexe (*Conseil*).

10.8.3 Besoins de formation aux nouvelles technologies pour augmenter leur acceptabilité

L'implémentation de nouvelles technologies nécessite des directives, des mesures de sécurité et, en particulier, une formation adéquate et suivie du personnel. Sans un programme de formation approprié sur place, les sociétés minières risquent de perdre du personnel et de faire face à une forte réticence à l'utilisation de ces technologies, car les employés ne seront pas formés sur ces nouvelles technologies. Ce risque de perte d'employés est accentué pour les sociétés minières qui embauchent des membres des Premières Nations, sur des sites situés dans le Grand Nord (RGA). L'implantation d'une technologie sur une flotte de véhicules nécessite aussi que soient dispensées des formations aux mécaniciens chargés de les entretenir (*Minière*).

Un consultant confirme qu'il existe des formations internes au sein des sociétés minières, en particulier dans les domaines de l'automatisation, de l'instrumentation et du contrôle. Mais ces technologies évoluent rapidement, et les mines fonctionnent encore selon des systèmes datant de plusieurs années. Certaines mines avec une durée de vie initialement prévue de 7 à 8 ans sont maintenant en activité depuis une trentaine d'années. Par

conséquent, les employés qui travaillent depuis 20 ans sur ces sites sont moins à l'aise avec les nouvelles technologies (*Conseil*). Par ailleurs, selon un autre de nos interlocuteurs, bien que certaines entreprises minières aient su développer leurs propres compétences en interne, il semble aussi que d'autres soient moins actives sur le plan des formations en interne (*RGA*).

10.8.4 Enjeux d'attraction de main-d'œuvre

Actuellement, l'industrie minière québécoise fait face à une pénurie de main-d'œuvre, et les sociétés minières se concurrencent pour recruter au sein du même bassin de travailleurs expérimentés (*Minière, Conseil*). Cette concurrence est à l'échelle mondiale, dans la mesure où la main-d'œuvre québécoise s'exporte aussi en Afrique, en Amérique du Sud et en Australie (*Conseil*). Un investisseur interrogé nous indique qu'il manque notamment des ingénieurs miniers, des métallurgistes et des spécialistes en consultation de projets de développement, ce qui pousse les entreprises minières à des solutions coûteuses pour attirer ces professionnels techniques. Cette pénurie se fait ressentir particulièrement dans les projets situés dans des régions éloignées. Une approche couramment utilisée pour pallier cette situation consiste à offrir des salaires plus élevés afin de les attirer, entraînant ainsi une hausse des coûts de production. Dans ce contexte, il devient alors difficile de financer de nouvelles initiatives technologiques ou d'améliorer les projets existants. Toutefois, cela peut également susciter une motivation à trouver des solutions innovantes, comme l'automatisation des processus, ou l'utilisation de technologies telles que l'intelligence artificielle pour analyser les échantillons de roches dans les mines et ainsi améliorer leur traitement et leur efficacité (*Investisseur*).

L'ouverture de centres de contrôle à distance devrait contribuer à faciliter les conditions de travail de certains employés des sociétés minières, en offrant plus de flexibilité horaire et en rendant possible le travail en dehors des sites. Cependant, il y aura toujours des personnes qui préféreront travailler sur place (*RGA*). Sur ce plan, il existe une perception répandue selon laquelle les minières font travailler leurs employés sur des sites isolés, mais en réalité, la plupart d'entre elles ont leurs bureaux dans les grands centres urbains, là où les activités d'analyse de données peuvent être effectuées (*RGA*).

10.8.5 De nouvelles compétences recherchées, mais en concurrence avec d'autres secteurs industriels et d'autres pays

Par ailleurs, dans le contexte de l'automatisation et de l'électrification des mines, l'analyse des données joue un rôle crucial. Ces compétences sont notamment présentes dans la région de Montréal, et desservent plutôt les secteurs industriels et commerciaux que le

secteur minier. De plus, les compétences québécoises en intelligence artificielle et en analyse de données sont aussi très sollicitées par les États-Unis et l'Europe (*Minière*).

Considérant la pénurie de talents ayant des expertises en R&D et en analyse de données, la concurrence que se livrent les sociétés minières pour attirer des professionnels compétents ailleurs devrait surtout favoriser les plus grandes entreprises. L'attraction des talents sera un véritable enjeu pour les petites minières (*RGA, Conseil*). Quoi qu'il en soit, les entreprises minières auront besoin de ces ressources à l'avenir, et devront considérer l'attraction vers l'industrie minière de professionnels issus d'autres domaines que les mines et la géologie (*RGA*).

10.8.6 Un besoin de connaissances et de compétences à l'interne comme prérequis à l'adoption d'innovations

Il ressort aussi de nos échanges qu'au sein des directions des compagnies minières, il est souvent demandé lors des discussions au sujet d'une nouvelle technologie d'innovation si une personne autour de la table dispose de connaissances ou d'une expérience préalable avec celle-ci. Si la réponse est négative, l'innovation risque d'être écartée. Par conséquent, une technologie d'innovation doit être préalablement bien connue et avoir été bien expérimentée par des experts à l'interne pour être crédible et considérée (*RGA*).

Selon un répondant, les ingénieurs spécialisés dans le domaine minier au Canada se concentrent principalement sur les opérations telles que l'extraction et la séparation des minéraux, plutôt que sur la recherche et le développement de nouvelles technologies et méthodes. Il y a une diminution du nombre de professionnels se spécialisant dans ces domaines appliqués au Canada, possiblement imputable d'une part à un manque de connaissance des technologies existantes, d'autre part à une réticence à tester de nouvelles approches ou à s'informer à leur sujet. Cependant, les ingénieurs se renseignent sur les différentes technologies utilisées ailleurs, par exemple en Australie. Certains experts en génie des procédés ont pu développer une expérience pratique de ces équipements, ce qui est valorisé par les gestionnaires et les directions des entreprises minières (*RGA*).

11 Faits saillants des entrevues sur l'écosystème de l'industrie minière qui influence l'adoption d'innovations au Québec

11.1 Quelques généralités sur l'écosystème de l'industrie minière

11.1.1 Des enjeux liés à l'éloignement d'un écosystème d'innovation

Le risque est amplifié par l'éloignement du site minier par rapport à un écosystème d'innovation dédié à l'industrie minière. Par exemple, la région de Val-d'Or abrite un écosystème robuste comprenant diverses opérations minières, des entreprises fournissant des équipements, des experts techniques et technologiques, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée. La proximité de cet écosystème semble augmenter la propension à une plus grande prise de risques par rapport à un site isolé (RGA).

11.1.2 Des enjeux écosystémiques

Nos entretiens ne font pas ressortir de consensus net sur le degré de collaboration entre les différents intervenants de l'écosystème minier québécois. Sur un plan général, pour l'un des chercheurs interrogés, les différentes parties prenantes de l'industrie minière font face à des défis en matière de communication et de collaboration (RGA). Selon un autre chercheur, les minières échangent beaucoup d'informations et d'innovations, sauf en ce qui concerne les données géologiques sensibles (RGA).

Un équipementier nous indique que certaines collaborations existent entre les compagnies minières québécoises, mais limitées en raison de la concurrence directe sur le marché. Ces partenariats se concentrent principalement sur la vente d'équipements, reléguant souvent la technologie à un plan secondaire (*Équipementier*). Il nous a aussi été rapporté qu'au Québec, en particulier en Abitibi où la plupart des mines sont aurifères, les minières ont développé un esprit de collaboration les unes avec les autres et échangent des informations sur leurs méthodes de travail. L'exemple d'une société minière qui a démontré l'efficacité de son nouveau système de communication a notamment été suivi par les autres qui l'ont adopté. Cette attitude de partage des meilleures pratiques et d'apprentissage mutuel favorise l'innovation et l'amélioration des opérations minières dans la région (RGA).

Du côté de la recherche, un équipementier nous fait part du fait que les articles scientifiques se concentrent sur les solutions technologiques, tandis que l'industrie minière est davantage axée sur des programmes et feuilles de route stratégiques pour la transformation numérique (*Équipementier*). Selon un autre répondant, la recherche universitaire pourrait potentiellement jouer un rôle moteur dans l'innovation minière,

mais cela ne semblerait pas véritablement une réalité pour le moment. Les chercheurs académiques québécois publient des articles dans des revues spécialisées réputées et développent de nombreuses idées qui se concrétiseraient difficilement au Québec (RGA). Enfin, l'industrie minière, consciente de ses obligations croissantes en matière de critères ESG, éprouverait selon un intervenant des difficultés à intégrer pleinement les avantages technologiques dans ses pratiques. Il serait, par conséquent, nécessaire pour elle de travailler de concert avec les investisseurs sensibles à ces aspects, pour améliorer son image et démontrer ses engagements envers les aspects ESG (RGA).

11.2 Influence des gouvernements sur l'adoption d'innovations

Les enjeux réglementaires n'avaient pas été mis en avant dans la littérature en tant que facteur significatif ayant un impact sur l'innovation. Toutefois, au cours de nos entrevues, ces enjeux ont émergé, en particulier lors des entretiens avec des représentants gouvernementaux, des chercheurs et des associations minières. Ces parties prenantes ont souligné l'importance des réglementations et des politiques dans le contexte de l'innovation dans le secteur minier. Les prochains paragraphes mettent en évidence les points clés liés aux enjeux réglementaires qui ont émergé au cours des entretiens.

11.2.1 Des programmes gouvernementaux pour stimuler l'innovation

Il ressort de nos entrevues qu'il existe au Québec plusieurs programmes de soutien et des stratégies gouvernementales principalement portées par le MRNF dédiés au soutien à la R&D dans le secteur minier, tels que le Programme d'appui à la recherche et à l'innovation du domaine minier, le Programme de soutien au développement durable pour les entreprises du secteur minier et, plus récemment, la création d'un réseau de recherche scientifique dédié aux minéraux critiques et stratégiques. Cependant, il a été constaté que la plupart des entreprises ou sociétés, en particulier celles venant d'autres régions pour l'exploration, ne sont pas toujours informées de ces outils de financement et d'accompagnement (RGA). Ces différents programmes ont été évoqués dans la partie sur la revue de la littérature.

11.2.2 Une nécessité d'aligner les cadres réglementaires avec les avancées technologiques

Il ressort de nos entrevues que dans le cas de l'autonomisation des mines, la législation minière n'a pas tout à fait suivi les avancées technologiques et doit donc évoluer. Actuellement, du fait qu'elles ne connaissent pas parfaitement le fonctionnement et l'efficacité des moyens de détection des véhicules autonomes, les minières prennent des mesures de sécurité très strictes en isolant les galeries souterraines étroites où opèrent

les véhicules autonomes, pour préserver la sécurité des travailleurs (RGA). Un cadre réglementaire doit aussi être mis en place pour entourer l'électrification des mines souterraines (RGA).

L'électrification des flottes de véhicules dans les mines souterraines entraîne aussi des normes de sécurité supplémentaires pour leur maintenance en raison des risques d'incendie et de la circulation continue de l'électricité même lorsque les véhicules sont éteints, et que doivent prendre en compte les entreprises minières dans leur transition vers l'autonomisation (RGA).

11.2.3 Une harmonisation des réglementations pour stimuler l'innovation

De leur côté, les multinationales sont confrontées à une régulation variant selon les pays, ce qui influence leurs choix d'implémentation de technologies autonomes. Si un pays offre un environnement plus propice à l'adoption de ces technologies, les entreprises choisiront de s'y installer (RGA). Par ailleurs, il existe aussi des différences de réglementation au Canada qui peuvent empêcher le transfert de certaines technologies d'une province à l'autre ; cela est notamment le cas dans le domaine de la ventilation entre la Colombie-Britannique et le Québec comme nous l'a rapporté un répondant de l'industrie minière (Minière).

11.2.4 Une protection des idées par des brevets pour stimuler l'innovation

Pour finir, selon un autre répondant de l'industrie minière, il est primordial que les idées mises en œuvre soient protégées par des brevets et prémunies contre l'espionnage industriel, afin de rester à la pointe de l'innovation par rapport aux concurrents. Le fait que des concurrents puissent copier des innovations peut décourager les investissements futurs. Cet enjeu peut devenir plus important dans le cas des minéraux critiques. Les minières cherchent à développer de nouvelles méthodes d'extraction de ces minéraux précieux dans des gisements de taille réduite, induisant des risques d'espionnage industriel pour s'approprier ces avancées techniques (Minière). En conséquence, les sociétés minières pourraient parfois hésiter à s'engager pleinement dans la recherche et le développement, de crainte que leurs investissements élevés ne profitent également à d'autres sans que ceux-ci aient contribué financièrement (Minière).

11.3 Influence des équipementiers sur l'adoption d'innovations

11.3.1 Le rôle des équipementiers dans l'adoption d'innovations

Les entreprises minières sont très sollicitées par les équipementiers et développeurs de solutions technologiques, et doivent filtrer les propositions en fonction de leurs domaines prioritaires. Les technologies liées à l'énergie, à la décarbonisation et à la numérisation sont particulièrement examinées. Les minières cherchent aussi de leur côté à influencer les grands équipementiers pour qu'ils développent des solutions alignées sur leurs besoins technologiques futurs (*Minière*).

Conformément à la littérature qui évoquait un changement de paradigme dans la dynamique de l'innovation dans le secteur minier et mettait en avant les nouveaux rapports de force entre les METS et les entreprises minières, en particulier dans le contexte de la transformation numérique, nos entretiens corroborent cette tendance.

En effet, selon un répondant, les équipementiers détenaient initialement un certain pouvoir dans l'industrie minière en proposant leurs machines et des solutions d'ingénierie aux entreprises minières. Aujourd'hui, la situation s'est inversée dans la mesure où les sociétés minières cherchent des technologies compatibles avec les équipements de différents manufacturiers. Les minières définissent d'abord leurs projets et les technologies à implémenter, par exemple des solutions d'électrification, puis les équipementiers proposent des équipements adaptés. Actuellement, les collaborations entre les sociétés minières et les équipementiers sont établies selon des objectifs d'exploitation minière intelligente et de critères ESG (*RGA*).

Lors du développement d'un projet, les entreprises minières font appel aux équipementiers afin d'obtenir des estimations de coûts et de dimensionner certains équipements. Dans la plupart des cas, ceux-ci essaient de promouvoir de nouvelles technologies qui ne présentent pas beaucoup de risques pour le projet. Par exemple, des technologies telles que l'échantillonnage automatisé peuvent être considérées comme des accessoires qui ne risquent pas de mettre en péril le succès du projet minier. Cependant, en raison de leur coût élevé, ces technologies sont les premières à être écartées lorsque des ajustements budgétaires sont effectués (*RGA*).

Par la suite, que ce soit pendant les opérations courantes ou au début d'un projet, deux aspects se démarquent. Tout d'abord, lors des interruptions planifiées où la mine s'arrête temporairement, il y a une course contre la montre pour effectuer le maximum de maintenance préventive et de changements nécessaires. Ces arrêts sont planifiés en collaboration avec les équipementiers plusieurs mois à l'avance, permettant ainsi le développement de stratégies pour résoudre les problèmes techniques qui se posent.

Ensuite, dans les opérations quotidiennes, l'innovation peut consister à remplacer les produits à forte teneur en carbone par des alternatives plus respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, les partenariats entre les sociétés minières et les équipementiers deviennent avantageux pour les deux parties, en répondant à une demande du marché et de la société en général (*Conseil*). Pour des procédés moins connus, des usines de démonstration à échelle réduite sont mises en place afin de démontrer aux investisseurs leur bon fonctionnement et leur viabilité (*Conseil*).

11.4 Influence des consultants impliqués dans les rapports techniques NI 43-101 sur l'adoption d'innovations

Selon un consultant interrogé, les firmes de conseil servent de pont entre les entreprises minières et les équipementiers. Une technologie ou un logiciel proposé dans un rapport NI43-101 aura nécessairement été analysé par les consultants avec l'équipementier concerné. Généralement, si les firmes de conseil peuvent émettre des recommandations technologiques, ce sont toujours les sociétés minières clientes qui prennent la décision finale. Pour ces dernières, l'innovation technologique a son importance, mais certains clients tendront à privilégier des solutions moins coûteuses, tandis que d'autres adopteront une perspective à long terme pour un rendement de l'investissement potentiellement plus élevé (*Conseil*). Ainsi, il nous est confirmé que les recommandations en termes d'adoption d'innovations formulées par les firmes de consultation ne sont ainsi pas toutes nécessairement suivies par les entreprises minières (*RGA*). Par ailleurs, celles-ci ne demandent pas nécessairement d'obtenir de la part des consultants des propositions audacieuses dans les rapports NI43-101 en termes d'innovations technologiques (*Conseil*).

Les consultants jouent aussi un rôle dans la gestion de projet, notamment dans la conception des mines et des sites, et doivent s'assurer de la pertinence et de la faisabilité des innovations proposées dans la rédaction des rapports NI43-101. Ceux-ci sont, par nature, destinés à apporter aux investisseurs sur les marchés financiers une garantie supplémentaire pour la fiabilité des projets d'investissements miniers proposés, et les éléments qu'ils contiennent en matière de recommandation de technologies servent essentiellement de base de travail initiale pour les entreprises minières, lesquels pourront par la suite prendre des décisions plus tard dans le processus (*Conseil*).

Par ailleurs, deux des équipementiers que nous avons interrogés nous ont aussi fait part du fait que les rapports NI 43-101 trouvent surtout leur importance au stade de l'exploration minéralogique des sites, moins lorsque l'exploitation est déjà lancée (*Équipementier*). Sur ce plan en effet, les suggestions de nouvelles technologies figureront

dans les premiers rapports de faisabilité, mais le client sera avant tout intéressé par la réalisation et la rentabilité du projet (*RGA*).

Pour finir, un autre consultant avance l'idée que leur influence dépend également du niveau de maturité de leurs clients. Lorsqu'il s'agit d'une grande entreprise minière déjà en activité, connaissant bien son secteur et dotée d'une équipe technique expérimentée et nombreuse, l'influence de la firme de conseil est moindre. Dans cette situation, celle-ci s'intègre dans les équipes en place et doit déterminer quelle valeur ajoutée elle peut y apporter. Et c'est souvent la société minière qui avance les idées, et demande à la firme de conseil d'en étudier la faisabilité. En revanche, lorsque la société minière cliente est moins mature et n'a pas encore de site en exploitation, le rôle de la firme de conseil est beaucoup plus important. Celle-ci est amenée à collaborer plus étroitement avec certains dirigeants de la société minière cliente (*Conseil*).

11.5 Influence des investisseurs sur l'adoption d'innovations

La littérature existante contenait peu d'informations sur le processus d'investissement dans le secteur minier et les critères pris en compte par les investisseurs. Les entretiens ont donc grandement contribué à approfondir notre compréhension de la manière dont les décisions de financement sont prises au Québec et de l'importance des différents acteurs impliqués dans ce processus.

11.5.1 Le rôle des investisseurs et des consultants dans l'adoption d'innovations

Bien que leurs mandats, budgets et perspectives puissent varier, les différents organismes d'investissement du Québec financent ensemble et se complètent sur des projets. Ils communiquent entre eux pour proposer des améliorations lorsque certains éléments ou informations manquants sont identifiés, par exemple sur la gouvernance (*Investisseur*).

11.5.2 Les critères pris en compte par les investisseurs

11.5.2.1 Des financements différenciés en fonction des objectifs spécifiques de chaque investisseur

Il ressort de nos entrevues qu'au Québec, les investisseurs institutionnels majeurs de la province dirigent leurs investissements selon des profils d'entreprises et des critères de rendement et de risque déterminés en fonction de leur mandat respectif. Quel que soit celui-ci, les résultats financiers des entreprises et la rentabilité des projets dans lesquels ils investissent demeurent la priorité essentielle pour eux (*RGA*).

Les gestionnaires de portefeuille examinent notamment la valeur intrinsèque des titres dans lesquels ils investissent sur la base de divers indicateurs, et cherchent à sélectionner des entreprises offrant de meilleurs rendements par unité de risque (*Investisseur*). Cela étant, ces investisseurs présentent aussi des profils, objectifs et attentes variés :

- Certains cherchent des rendements à court terme, tandis que d'autres spéculent et anticipent la croissance. D'autre part, des investisseurs institutionnels s'intéressent aux entreprises responsables pour placer leurs capitaux. Leurs attentes varient considérablement (*RGA*).
- Comme précisé par un investisseur interrogé, les grands investisseurs institutionnels du Québec comme la Caisse de dépôt et placement du Québec (CDPQ), Investissement Québec ou le Fonds de solidarité FTQ ont généralement pour mandat d'investir dans des entreprises dont le siège social est situé au Québec dans une optique de développement et de maintien de l'emploi dans la province, tandis que les firmes d'investissement privées n'ont pas cette contrainte géographique (*Investisseur*).
- Un expert minier avance que les grands investisseurs au niveau international, notamment américains, ont tendance à investir dans les entreprises minières à très grande capitalisation (ce que l'on appelle les « *blue chips* ») et à y consacrer des montants bien plus élevés que les investisseurs institutionnels québécois, qui s'intéressent à un éventail d'entreprises locales beaucoup plus large de taille intermédiaire, en particulier les PME (*Minière*).
- Les portefeuilles des fonds d'investissement régionaux sont diversifiés sur le plan des spécialités, et incluent notamment des équipementiers, fournisseurs de pompes industrielles, entreprises spécialisées dans le forage et le dynamitage pour les opérations minières dans les exploitations à ciel ouvert (*Investisseur*).

11.5.2.2 Des décisions d'investissement prises selon certaines caractéristiques propres à l'innovation

L'innovation en tant que telle et les enjeux qui l'entourent font aussi partie des critères considérés par les investisseurs dans leur analyse d'entreprises :

- Les aspects examinés concernent l'équipe de direction, les budgets alloués à l'innovation, l'assurance que la technologie annoncée est efficace et a été prouvée ailleurs, ainsi que les processus pour son implémentation et sa mise en marché (*Investisseur*).

- Pour les investisseurs privés, le retour sur investissement de l'innovation doit être situé au minimum à 20 % selon un investisseur (*Investisseur*) et à 30 % selon un consultant et un expert minier (*Conseil, Minière*), et le délai de récupération idéalement de 18 mois (*Investisseur*) et ne pas dépasser deux ans (*Minière*).

De plus en plus, l'impact environnemental des opérations et la responsabilité sociale des entreprises deviennent des critères considérés par les investisseurs (*RGA, Investisseur*). Cependant, un expert minier affirme que l'aspect ESG n'est pas encore la priorité pour tous et passera derrière les considérations de rentabilité, en particulier lorsque le montant investi est très élevé (*Minière*).

11.6 Un besoin de collaboration sur toute la chaîne et avec tous les acteurs du secteur minier

Une condition de succès pour l'adoption des technologies fréquemment ressortie dans nos entrevues est qu'une approche collaborative entre les acteurs de l'écosystème incluant les minières, les équipementiers, mais aussi les investisseurs et les régulateurs, contribuera à améliorer la technologie et à convaincre les clients d'adopter de nouvelles technologies innovantes (*Équipementier, Investisseur, Conseil*). Ces constatations renforcent les conclusions de la littérature qui stipulent que la coopération et la collaboration entre tous les intervenants sont nécessaires pour favoriser un climat propice à l'innovation.

- Les compagnies minières doivent travailler en étroite collaboration avec les équipementiers, tels que les fabricants de véhicules ou de semi-conducteurs, dès les premières années du projet (*RGA*).
- La collaboration entre les différents ministères et organismes gouvernementaux est également essentielle pour faciliter les démarches administratives et améliorer la communication entre les différents paliers gouvernementaux (*RGA*).
- La collaboration entre l'industrie et les universitaires est nécessaire pour accompagner la transformation numérique (*RGA*).

Il serait souhaitable pour les programmes gouvernementaux que se regroupent l'ensemble des intervenants de l'écosystème minier québécois, que ce soit le milieu académique, les entreprises, les OBNL ou les laboratoires pour favoriser la recherche collaborative, et répondre à des enjeux ou des problématiques communes dans l'industrie et ainsi bénéficier au plus grand nombre.

Plus particulièrement, l'intérêt du ministère est croissant pour les projets dans le domaine des minéraux critiques et stratégiques, généralement menés par des sociétés minières juniors (*RGA*). À ce titre, sur un plan de chaînes d'approvisionnement, il nous a été précisé que le Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025¹⁶ et la Stratégie québécoise de développement de la filière batterie¹⁷ ont été alignés pour permettre aux produits minéraux d'être transformés au Québec, l'objectif étant de réduire la dépendance aux fluctuations grâce à une chaîne globalement respectueuse de l'environnement (*RGA*).

¹⁶ Voir : <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-quebécois-valorisation-mineraux-critiques-strategiques>

¹⁷ Voir : <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/strategies/strategie-quebécoise-de-developpement-de-la-filiere-batterie>

12 Faits saillants des entrevues sur le contexte ESG qui influence l'adoption d'innovations dans le secteur minier au Québec

12.1 Conscience des enjeux ESG par l'industrie minière

Pour plusieurs de nos interlocuteurs, il est clair que l'industrie minière est probablement l'un des secteurs les plus à l'écoute et avancés en matière de prise en compte et de compréhension des questions d'acceptabilité sociale et environnementale, notamment les aspects liés aux rejets dans l'eau, à la qualité de l'air, au bruit et autres nuisances (*Conseil, Minière*). Les critères ESG entrent dans les planifications stratégiques des minières et des équipementiers (*RGA, Équipementier*), et les entreprises minières s'engagent activement dans des initiatives visant à réduire leur impact sur l'environnement, en particulier leur empreinte carbone (*RGA*). Elles sont contraintes de les respecter également en raison de l'acceptabilité sociale et de la pression du marché. Les investissements dans le secteur minier sont fortement conditionnés par le respect de ces critères (*RGA*).

Il ressort également sur ce point que, face à la préoccupation du grand public concernant l'image que renvoie l'industrie, les entreprises minières sont conscientes de devoir affirmer et montrer leur souci de contribuer à la protection de l'environnement et consentent à des efforts en ce sens (*RGA, Conseil*). Selon un répondant de l'industrie minière, un changement de mentalité s'opère actuellement du côté des dirigeants, pour qui la perspective financière n'est plus la seule préoccupation et qui fixent désormais des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre (*Minière*). Les minières doivent aussi démontrer qu'elles agissent de manière responsable pour rester attrayantes pour les employés et maintenir l'acceptabilité sociale. Il ne s'agit plus seulement d'une question économique, mais aussi d'un droit d'opérer. Certaines sont donc soucieuses d'instaurer une culture de tolérance zéro envers les écarts environnementaux (*Minière*).

Pour les minières, les considérations ESG font partie intégrante de chaque phase et composante d'un projet minier (*Minière*). Avant même de débiter l'exploration, la réussite d'un projet tient d'abord à l'évaluation de la stabilité de l'environnement social et de la juridiction. Ensuite, l'aspect environnemental devient une préoccupation, suivie par l'attention portée à la gouvernance lorsque le projet prend de l'ampleur. Tout au long du processus, le volet social de l'ESG reste un élément crucial pour garantir une exploitation responsable et durable. Lorsque le projet atteint une envergure plus importante, la

manière dont l'entreprise est dirigée et gérée devient un facteur déterminant pour son succès et son impact sur l'environnement et la société (*Minière*).

Sur ce point, un répondant de l'industrie minière indique qu'il existe aussi actuellement une forte pression de la part des hautes directions pour approuver parfois certains projets moins profitables afin de maintenir leur image sur le marché et de répondre aux exigences des parties prenantes externes comme les investisseurs. Cette pression externe a conduit à la considération de projets qui pourraient ne pas être financièrement rentables, mais qui contribuent aux objectifs ESG à long terme, spécifiquement dans la période allant de 2030 à 2050 (*Minière*).

Par ailleurs, un chercheur mentionne le fait que la préservation du pergélisol est aussi devenue une préoccupation importante pour les entreprises minières sur le plan de leurs infrastructures. Avec les changements climatiques, elles sont confrontées à la nécessité de revoir leur approche pour sites situés dans les régions concernées, dans la mesure où un dégel pourrait causer des problèmes sérieux aux infrastructures en surface, notamment les parcs à résidus miniers (*RGA*). De nos jours émerge également une autre tendance mentionnée par un équipementier, qui consiste à valoriser l'ensemble des minéraux présents dans les rejets miniers. Les entreprises s'efforcent désormais de valoriser la totalité de ces résidus, en cherchant, par exemple, à extraire non seulement du magnésium, mais également d'autres éléments du tableau périodique afin d'accroître la valeur de leurs revenus par rapport à la roche initialement concassée (*Équipementier*).

Quoi qu'il en soit, il nous a été rapporté que bien que cette idée occupe une place plus importante dans le discours actuel, les considérations ESG sont loin d'être une nouvelle réalité et ont toujours été une préoccupation pour les entreprises minières. Auparavant, les concepts ESG étaient désignés sous le terme de Responsabilité sociale des entreprises (RSE). Des discussions étaient déjà entamées sur le développement durable il y a plus de dix ans, et des pratiques étaient déjà en place. Les aspects relatifs aux questions de gouvernance sont également une réalité déjà établie depuis longtemps chez les sociétés minières. Aujourd'hui, il y a des pressions supplémentaires, mais qui n'ont pas un impact considérable dans la mesure où ces questions faisaient déjà partie des pratiques (*RGA*).

Aujourd'hui, les critères ESG sont aussi reliés à une question d'acceptabilité sociale sur laquelle les entreprises minières ne peuvent faire l'impasse, et ce à tous les stades des projets (*RGA*). Certains projets avec un indice ESG élevé peuvent encore être confrontés à un manque d'acceptabilité sociale et être refusés par les organismes de régulation comme le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) (*Minière*). Un investisseur renchérit sur ce point, indiquant que les premières interactions d'une compagnie minière avec les communautés locales et les Premières Nations peuvent déterminer le succès ou l'échec d'un projet minier. L'établissement d'une communication transparente dès le

début du projet est essentiel afin d'obtenir l'acceptabilité sociale nécessaire (*Investisseur*). À cet égard, un de nos répondants de l'industrie minière précise que les entreprises minières ont des experts régionaux affectés aux questions autochtones, et ont amélioré leurs échanges avec les communautés du Canada (*Minière*).

Pour finir, comme mentionnée par un consultant, une entreprise minière responsable en mesure de démontrer son engagement face à l'impact social aura des bénéfices en termes de recrutement (*Conseil*). Les travailleurs montrent en effet une certaine réticence à rejoindre une entreprise qui ne respecte pas les lois en vigueur (*Minière*). Par ailleurs, les entreprises minières qui s'engagent dans des pratiques plus vertes peuvent bénéficier d'un taux de financement plus avantageux lorsqu'il s'agit de lever des capitaux ; la CDPQ prévoit, par exemple, du financement dédié pour les entreprises ayant des projets de transition énergétique (*Investisseur*). Mais de manière générale, les investisseurs sur les marchés financiers ne tendent pas particulièrement à récompenser les projets « verts », et les considèrent comme potentiellement plus risqués (*Conseil*).

12.2 Défis de l'intégration de l'ESG

Il ressort de nos entrevues que le principal défi relatif à l'intégration de l'ESG réside dans le fait que **la valeur économique de la conformité aux ESG des entreprises minières reste à l'heure actuelle difficilement chiffrable** (*RGA, Minière*). N'ayant à ce titre pas de coût ni de valeur clairement définie, l'atteinte des objectifs ESG présente le risque de ne pas être considérée comme une démarche rentable. Il n'existe pas de règle contraignante d'indice ESG qui conditionnerait, par exemple, l'octroi d'un permis d'exploitation. À défaut de sanctions ou de contraintes suffisantes prévues dans les réglementations, il sera difficile pour les entreprises d'attribuer une valeur économique tangible aux ESG ; pour l'heure, les décisions semblent reposer davantage sur des perceptions subjectives (*RGA*).

Selon un consultant, les considérations financières l'emportent à l'heure actuelle toujours sur les considérations écologiques. Cependant, la tendance pourrait changer à l'avenir, car les gouvernements cherchent à avoir une plus grande influence sur l'approvisionnement en métaux critiques et stratégiques (*Conseil*). De plus, les clients des entreprises minières, par exemple dans l'industrie automobile, sont de plus en plus exigeants quant aux aspects ESG des métaux qu'ils achètent. Ces clients, en particulier les marques de voitures de luxe, sont potentiellement prêts à payer une prime pour obtenir un aluminium « vert » et de haute qualité (*Minière, RGA*).

Par ailleurs, un investisseur consulté nous indique aussi qu'il existe un défi selon lequel le niveau de maturité de certaines PME concernant les critères ESG serait actuellement

faible. Ces entreprises rencontrent des défis pour les mettre en œuvre de manière concrète et documentée et ainsi prouver leurs engagements. Des efforts d'information, avec une communication adaptée, sur les enjeux et les avantages liés aux critères ESG sont nécessaires pour accompagner ces entreprises dans leurs démarches ESG (*Investisseur*).

Quoi qu'il en soit, sur un plan général, il est important pour les entreprises minières d'avoir une vision élargie pour répondre aux préoccupations environnementales, notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. Il est également crucial pour elles de tenir compte de toutes les étapes du cycle de vie relié à l'exploitation, de la conception à la fermeture des sites, ce qui requiert de trouver un équilibre entre l'environnement, la communauté et l'économie (*Minière*).

12.3 Enjeux opérationnels pour la conformité aux ESG

Comme l'indique un répondant de l'industrie minière, la conformité aux critères ESG représente des investissements conséquents pour les entreprises minières, d'abord dans les infrastructures et les équipements, mais aussi en termes de temps à préparer et satisfaire les exigences des rapports de performance. Sur ce dernier aspect, il est de plus en plus nécessaire de mesurer le bilan d'eau, l'impact environnemental, ainsi que l'incidence sur la qualité de l'air. L'équité interne en termes de diversité et le traitement des communautés locales doivent également être évalués. Ces considérations nouvelles pour les entreprises minières créent la nécessité pour elles d'investir dans les ressources humaines et les systèmes adéquats afin d'améliorer les capacités de mesure et de divulgation de ces informations (*Minière*).

De plus, la collecte de données pour les rapports ESG implique à la fois des méthodes manuelles et automatisées, et des défis découlent de la grande quantité de données à traiter d'une part, et de leurs interprétations d'autre part :

- Beaucoup d'efforts ont été entrepris du côté des minières pour rationaliser les processus dédiés, mais certaines parties restent encore manuelles. Sur certains aspects et selon la nature des données, le traitement peut être fait sur des bases de données Excel, avec les risques d'erreurs que cela engendre. Mais des solutions sont en cours de développement pour collecter les données et pouvoir les présenter de différentes manières selon les besoins, que ce soit au niveau du site, de l'entreprise ou selon des métriques spécifiques (*Minière*).
- Plusieurs facteurs ESG doivent être pris en compte, et il peut être difficile de comparer les données ESG entre différentes opérations d'une même entreprise et aussi entre les entreprises (*Minière*).

Comme le mentionne un consultant, la plupart des grandes entreprises minières produisent déjà des rapports ESG. Même s'ils ne couvrent pas toutes les mesures, ils présentent un certain niveau de sophistication, de suivi et de contrôle. Les entreprises qui sont en avance dans cette transition investissent massivement pour inventorier les données qu'elles devront surveiller. Cette démarche requiert un processus complexe, et les entreprises n'ont d'autre choix que de commencer à la planifier dès maintenant (*Conseil*).

Les rapports ESG ont leur importance pour les investisseurs, mais il existe une incertitude quant à la façon dont ceux-ci évaluent les facteurs ESG en termes de rentabilité (*Minière*). Sur cette idée, selon un autre professionnel de l'industrie minière, les décisions favorisant des projets responsables n'ont pas encore démontré de changements concrets en termes de meilleurs coûts du capital et d'emprunt. Cette situation pourrait cependant évoluer, car à l'avenir, des investisseurs, notamment les comités de risque des grandes banques, pourraient être disposés à privilégier la responsabilité au détriment du rendement financier, ce qui pourrait se traduire par une baisse du coût de financement pour les projets responsables grâce à cet intérêt accru des prêteurs pour l'environnement. Cependant, un tel changement n'est, pour l'heure, pas encore observable au sein de l'industrie minière (*Minière*). Maintenant, comme rapporté par un professionnel de l'investissement, s'il est difficile d'attribuer des valeurs précises sur la conformité aux ESG, certains investisseurs disposent néanmoins de statistiques démontrant que les entreprises fortement axées sur l'ESG sont généralement plus rentables, attirent davantage de jeunes talents et réussissent mieux dans l'innovation, ce qui favorise la rétention de personnel (*Investisseur*).

Pour finir, un consultant nous rapporte que les entreprises minières doivent aussi savoir faire preuve d'une grande prudence dans leur manière de communiquer sur leurs pratiques ESG. Un excès de communication, comme cela a été le cas par le passé avec certaines entreprises, présente le risque de conduire à des interprétations négatives du côté du public, amplifiées de nos jours par les réseaux sociaux. La propagation d'un contenu mal interprété peut compromettre un projet entier (*Conseil*).

12.4 Guides de bonnes pratiques et réglementation

Du côté des initiatives de cadres sectoriels, le protocole VDMD¹⁸ a été mentionné au cours de nos entrevues. Son objectif est de contribuer à améliorer la performance dans le secteur minier en matière de gestion des risques et des opportunités liés au climat. Sont ressortis les points suivants : (RGA)

- Les indicateurs du VDMD se concentrent sur la communication et la publication d'informations, mais ne sont pas prescriptifs. Ils exigent que des rapports publics soient établis concernant des facteurs liés à l'énergie ou à la sécurité, tout en laissant aux entreprises la liberté de choisir les indicateurs de performance clé les plus pertinents pour elles, leurs communautés concernées et leurs investisseurs (RGA).
- Initialement, lors du lancement du protocole VDMD, il était question de savoir si cela pouvait devenir une norme de traçabilité pour les chaînes d'approvisionnement, chose qui a été considérée comme très complexe. Par la suite, au cours des 5 à 7 dernières années, les discussions ont évolué vers des efforts de traçabilité des données ESG dans la chaîne de responsabilité (RGA).
- Au fil des années, l'initiative VDMD a aussi permis aux entreprises d'être plus transparentes sur leur interaction avec les communautés autochtones, passant de pratiques rudimentaires de collaboration avec ces communautés à une prise de décision collaborative et des obligations mutuelles (RGA).

Un de nos interlocuteurs de l'industrie minière a aussi évoqué l'initiative *e3 Plus*, mise en place en 2009 par l'association minière *Prospectors & Developers Association of Canada* (PDAC), et qui institue un cadre d'orientations pour une exploration responsable et une amélioration des performances sociales, environnementales, de santé et de sécurité des entreprises.¹⁹ Selon lui, cette directive à finalité ESG s'adressant aux sociétés d'exploration semble n'avoir eu que peu de résonance tant à son lancement qu'aujourd'hui (*Minière*).

Du côté des réglementations gouvernementales, le Canada et l'Amérique du Nord en général accuseraient, selon un consultant, un certain retard en particulier par rapport à l'Europe sur le plan des pratiques environnementales. Ce retard sur l'Europe en matière

¹⁸ Voir : <https://mining.ca/fr/ressources/guides-manuels/protocole-sur-les-changements-climatiques/#:~:text=L'objectif%20de%20ce%20protocole,et%20la%20production%20de%20rapports>

¹⁹ Voir : <https://www.pdac.ca/programs-and-advocacy/responsible-exploration/e3-plus>

de réglementation devrait avoir un impact sur la direction que prendra le secteur minier (*Conseil*).

Pour ce qui est des minéraux critiques et stratégiques, il apparaît que les différents paliers de gouvernement au Canada collaborent régulièrement ensemble pour discuter des problématiques sur les questions environnementales et prévoir des cadres réglementaires harmonisés entre les différentes instances, et également pour s'assurer que les autorités réglementaires sont alignées avec l'industrie, notamment dans le domaine des minéraux critiques et stratégiques. Sur les questions environnementales et les études d'impact environnemental et social, le gouvernement fédéral a de son côté alloué des fonds dans le budget 2023-2024 pour harmoniser certaines approches et éviter les doublons. Cependant, malgré la volonté annoncée, la feuille de route doit encore être présentée (*RGA*).

Le principal défi réside dans la manière de rendre compte des actions liées à l'ESG, sachant qu'il n'existe pas de critères internationaux standardisés. Actuellement, il y a presque autant de rapports ESG que de cabinets de consultants qui les rédigent (*RGA*). Bien que des efforts soient entrepris en ce sens, il y a actuellement un manque de standardisation pour les définitions, les méthodologies et la présentation de l'information. L'objectif serait de pouvoir trouver un moyen de réduire le nombre de rapports actuellement produits sur les aspects ESG en un seul rapport consolidé pour faciliter l'analyse comparative (*Minière*). Cela étant dit, un consultant avance l'idée que, si certaines entreprises ont pu par le passé maladroitement utiliser les ESG à des fins de marketing, la normalisation en cours des rapports ESG devrait jouer un rôle positif pour contrer d'éventuelles pratiques de *greenwashing* (*Conseil*).

Par ailleurs, selon un consultant, les outils utilisés par les investisseurs pour cibler spécifiquement des entreprises selon des critères d'intégration de facteurs ESG peuvent aussi être problématiques. Il peut y avoir un écart entre la divulgation que les entreprises effectuent pour être éligibles à ces outils et ce que recherchent réellement les investisseurs, écart se traduisant par une déconnexion entre les déclarations et les actions réelles sur le terrain. Ainsi, certaines entreprises, considérées comme étant en conformité avec les pratiques ESG sur le terrain, peuvent néanmoins ne pas être classées comme telles par ces outils. À l'inverse, il est possible pour une entreprise d'être qualifiée en conformité ESG sans véritablement l'être (*Conseil*).

En définitive, il ressort de nos entrevues que la multitude de cadres réglementaires et de certifications, portés par autant d'organismes et de consultants, qui existe actuellement dans le domaine minier est source de confusion et crée un enjeu de convergence vers laquelle il faudra tendre. Cette nécessité de convergence a notamment été mise en

évidence par l'*International Council on Mining and Metals (ICMM)*²⁰, un institut international du secteur minier, qui commence à regrouper des certifications selon des critères communs et un vocabulaire unifié. Malgré les défis associés à cette démarche, cet effort d'unification devient indispensable (*RGA*).

12.5 Innovation et atteinte des objectifs ESG

Nous avons posé la question de savoir si, et dans quelle mesure, l'adoption de technologies d'innovations de pointe pouvait aider les entreprises minières à atteindre leurs objectifs ESG. Il ressort de nos entrevues les points suivants :

- Selon un consultant, bien que les critères ESG et l'innovation ne soient pas des concepts nécessairement interreliés, celle-ci peut jouer un rôle dans les stratégies de développement responsable des entreprises minières dépendamment de leur gouvernance, leur vision et leurs objectifs (*Conseil*). Un autre consultant ajoute qu'il est devenu à la mode d'aligner l'exploitation minière avec des minéraux verts et la transformation technologique (*Conseil*).
- Pour les minières, le lien entre l'innovation et les ESG est aussi établi en ce sens que l'industrie minière se sert de l'innovation pour répondre à des besoins et des problèmes spécifiques, en tenant compte de facteurs tels que la durée de vie de la mine, les considérations régionales et l'acceptation réglementaire (*Minière*).
- Pour un investisseur, l'innovation peut, en plus d'améliorer les aspects opérationnels et financiers, aider les sociétés minières à atteindre leurs objectifs de durabilité sur le plan des émissions de carbone, la préservation des terres, de l'eau, de la biodiversité et la prise en compte des impacts sur les communautés (*Investisseur*). Les facteurs ESG prennent à ce titre une place de plus en plus importante dans les choix d'innovation et les investissements des compagnies minières (*RGA*). Aujourd'hui, les entreprises minières ne peuvent désormais plus faire l'impasse sur la nécessité de s'attaquer de manière proactive à ces enjeux afin d'assurer leur succès à long terme et de maintenir leur licence sociale d'exploitation (*Investisseur*).
- D'après un consultant, sur le plan social, l'innovation peut réduire l'impact négatif de certaines industries sur la société. Par exemple, le remplacement des camions diesel par des camions électriques dans une mine à ciel ouvert améliore la qualité de vie des résidents du secteur en réduisant le bruit et en créant des emplois

²⁰ Site institutionnel de l'ICMM : <https://www.icmm.com/>

mieux rémunérés grâce à des tâches exigeant des compétences plus avancées. En revanche, l'impact de l'innovation est **moins évident sur les aspects de gouvernance** (*Conseil*).

- En général, ce sont surtout les investisseurs, aux considérations et motivations diverses et parfois divergentes vis-à-vis des ESG, qui déterminent dans quelle mesure ces deux concepts sont liés. Certains continuent de soutenir les énergies fossiles pour des considérations de rentabilité, quand d'autres préfèrent favoriser les investissements dans des technologies plus respectueuses de l'environnement. C'est à ce titre que s'établit la pertinence de l'innovation par rapport aux ESG (*Conseil*).

12.6 Influence de l'écosystème pour une transformation de l'industrie vers les ESG

Il ressort de nos entrevues que le marché boursier serait très sensible aux critères ESG, et que les investissements dans le secteur minier sont fortement conditionnés par le respect de ces critères (*RGA, Conseil*). Les investisseurs souhaitent véritablement plus d'innovations qui puissent réduire les émissions de carbone, mais aussi pour des améliorations dans l'utilisation de l'eau, dans le traitement des eaux usées et dans la gestion des résidus, et que l'industrie minière adopte une sorte d'approche d'économie circulaire. Des efforts d'innovation sont en cours dans ces domaines, mais restent insuffisants considérant les impacts du changement climatique observé (*Investisseur*).

Par ailleurs, les investisseurs considèrent de plus en plus le volet social comme un facteur de risque plus important que l'environnement, ce qui influe sur les décisions d'investissement (*RGA*). À cet égard, des outils financiers existent comme les titres obligataires assortis d'une contrainte ESG (*sustainability-linked bonds*), qui renforcent l'intérêt et les avantages d'investir dans des initiatives de développement durable (*Conseil*).

Un investisseur et un consultant interrogés avancent cette idée que certains investisseurs souhaitent tenir un rôle d'accompagnateurs pour les entreprises minières dans leurs démarches ESG, en fournissant des recommandations concrètes et en démontrant les avantages financiers et sociaux de cette approche. Même si elles n'apportent pas toujours des bénéfices à court terme, ils considèrent que les entreprises efficaces dans leurs pratiques ESG ont généralement de meilleures performances financières, une rétention

de personnel accrue et une plus grande attractivité pour les jeunes talents (*Investisseur, Conseil*).

À la lumière de ces éléments, les minières doivent tenir compte et se mettre en conformité avec les indicateurs ESG pour conserver leur financement, et commencent à prendre des mesures en ce sens afin de répondre aux exigences environnementales et attirer les investisseurs. Ce sont ces derniers qui ont le plus d'influence dans ce domaine (*RGA*). Ce point est cependant nuancé par un répondant de l'industrie minière, dans la mesure où selon un autre point de vue, certains investisseurs peuvent manquer de sensibilisation et de compréhension des facteurs ESG (*Minière*). De plus, selon un investisseur, certaines entreprises minières cherchent cependant davantage à se conformer aux normes de meilleures pratiques afin de maintenir leur permis d'exploitation plutôt que d'être influencés dans ce sens par les investisseurs (*Investisseur*).

Pour ce qui est des équipements, selon un investisseur, le critère principal pour les clients reste actuellement le prix, même si d'autres éléments tels que la qualité de l'offre et le service entrent aussi en ligne de compte. Lorsque deux entreprises sont en mesure de proposer un service similaire, les clients ont tendance à privilégier le fournisseur proposant le prix le plus bas. Cependant, il est possible pour ces fournisseurs de se différencier en mettant en avant des avantages spécifiques liés à l'efficacité énergétique et en proposant des arguments de vente basés sur l'angle ESG, et ainsi influencer positivement les clients sensibles à ces considérations (*Investisseur*).

Selon un consultant, les spécialistes en environnement des firmes de consultation collaborent étroitement avec les équipes d'ingénierie des grandes compagnies minières dès le début de projets potentiels sur des questions environnementales, par exemple des objectifs de diminution des émissions de gaz à effet de serre. Ces collaborations créent des opportunités d'innovation. Lorsque les entreprises minières ne disposent pas de l'expertise nécessaire sur ces questions, les firmes de conseil exercent une influence plus importante (*Conseil*). L'implication majeure des firmes de consultation concerne les aspects liés aux émissions dans l'air, et il est crucial que leurs experts actualisent régulièrement leurs connaissances. Sur cet enjeu, ces consultants ont la possibilité de s'appuyer sur leurs réseaux d'experts mondiaux et de bénéficier ainsi d'expériences avec des défis similaires hors du Québec (*Conseil*).

La RSE est devenue un sujet de réflexion important au sein des firmes de conseil, tant en interne qu'en externe. Les consultants doivent prendre en compte les risques liés à leurs clients, car une association avec une entreprise ne respectant pas les normes peut entraîner des risques opérationnels et réputationnels pour eux (*Conseil*).

Quant aux rapports NI43-101, un de nos interlocuteurs de l'industrie minière nous confirme le fait que ces études visent principalement à présenter des informations sur les réserves minières, leur potentiel d'investissement avec une approche basée sur la minimisation des risques associés, mais n'incluent généralement pas d'analyses détaillées sur les stratégies et les aspects ESG liés à l'exploitation minière (*Minière*).

Les consultants et les fournisseurs de services cherchent également à diversifier leur offre pour attirer un large éventail de clients. La gouvernance d'entreprise et la vision des entreprises entrent en ligne de compte de manière importante dans cette dynamique (*Conseil*).

Enfin, du côté des leviers gouvernementaux, les aspects ESG sont une composante obligatoire dans les critères d'évaluation des projets soumis aux programmes d'aide financière du Gouvernement du Québec pour l'industrie minière (*RGA*).

CONCLUSION ET DISCUSSION

13 Conclusion et discussion

Dans un contexte où le secteur minier québécois est confronté à des défis et opportunités sans précédent, il est essentiel d'apporter des réponses claires à certaines questions : quels sont les obstacles à l'adoption de technologies innovantes dans cette industrie ? Quels incitatifs encouragent l'intégration des innovations dans les opérations ? Comment les considérations environnementales, sociales et de gouvernance (ESG) influencent-elles les décisions d'investissement dans le secteur minier ?

Notre objectif était donc de plonger au cœur de ces mécanismes de prise de décision afin d'acquérir une compréhension approfondie des défis, incitatifs et influences qui façonnent l'innovation dans le secteur minier québécois. Cette étude s'inscrit aussi résolument dans le cadre de la transition numérique et des préoccupations grandissantes en matière d'ESG et apporte des contributions substantielles en termes de meilleure compréhension du paysage de l'adoption de l'innovation du point de vue de l'industrie minière.

Notre étude repose non seulement sur une revue de littérature, mais également sur des données qualitatives provenant de nombreux entretiens avec des experts miniers au Québec ainsi que des rencontres avec des professionnels de l'écosystème minier lors d'événements reliés à l'industrie auxquels nous avons participé. Les entrevues nous ont permis d'actualiser les constats issus de la littérature, qui se réfèrent généralement à des informations datant le plus souvent d'avant 2021. Cela était d'autant plus pertinent compte tenu des changements significatifs survenus ces dernières années dans le domaine des technologies innovantes et du fait que l'industrie semble se mobiliser très rapidement avec une courbe d'apprentissage très rapide. Les entretiens ont également joué un rôle essentiel en confirmant, réfutant ou tout du moins nuancant des éléments présents dans la littérature. Bien que ces données riches aient offert des perspectives utiles pour élargir notre compréhension actuelle des facteurs affectant l'adoption de la technologie dans l'exploitation minière, il est conseillé que les études futures utilisent une approche confirmatoire pour tester ces résultats en utilisant un échantillon de plus grande taille.

L'adoption de l'innovation dans l'industrie minière au Québec est influencée par une multitude de facteurs, qu'ils soient incitatifs ou barrières. Il est clair que le secteur minier est traditionnellement conservateur, ce qui peut entraver l'adoption de nouvelles technologies et pratiques. Cependant, la reconnaissance des avantages opérationnels

offerts par l'innovation, notamment l'automatisation, la transition numérique et les véhicules électriques, crée une incitation à l'adoption de ces nouvelles approches. Les contraintes proviennent à la fois des caractéristiques inhérentes au secteur minier et des contraintes organisationnelles. Les caractéristiques économiques propres à l'industrie, telles que l'intensité en capital du cycle minier, la dispersion géographique des ressources, et la dépendance aux prix mondiaux, ajoutent des défis supplémentaires à l'innovation. Le contexte organisationnel joue également un rôle crucial, avec des risques et incertitudes liés aux technologies non éprouvées, ainsi qu'une aversion aux pertes au sein des entreprises minières. Les ressources humaines, notamment une main-d'œuvre vieillissante et des besoins d'employés avec de nouvelles compétences en concurrence avec d'autres secteurs industriels, ajoutent une dimension importante à la problématique de l'innovation. L'écosystème de l'industrie minière, y compris le gouvernement, les équipementiers, les consultants et les investisseurs, influence également la dynamique de l'innovation.

Le tableau suivant permet de faire ressortir l'ensemble de ces facteurs.

GÉNÉRALITÉS SUR L'ADOPTION D'INNOVATIONS DANS LE SECTEUR MINIER AU QUÉBEC
<p>Un consensus sur l'adoption de l'innovation dans le secteur minier</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un secteur minier très conservateur ▪ Un besoin de rentabilité à la hauteur des investissements
<p>Quelques différences dans l'adoption de l'innovation selon le type et la taille de la mine et selon le minerai</p>
ENJEUX TECHNOLOGIQUES QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS
<p>Principales technologies émergentes : automatisation, transition numérique, véhicules électriques</p>
<p>Un consensus sur les bénéfices opérationnels apportés par les technologies innovantes</p>
<p>Des défis et des enjeux technologiques à l'adoption de l'innovation</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un besoin pour des tests pilotes ▪ Des enjeux d'interopérabilité ▪ Des enjeux quant à la propriété des données ▪ Les minières de plus en plus dépendantes de leurs fournisseurs pour leur propre innovation dans le contexte
CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES INHÉRENTES À L'INDUSTRIE MINIÈRE QUI INFLUENCENT L'ADOPTION D'INNOVATIONS

- Les gîtes miniers sont **non-renouvelables**
- Les minéraux sont **dispersés géographiquement**
- Le cycle minier est **intensif en capital**
- **Les étapes du processus de développement minéral** sont réalisées en silo et les choix technologiques sont souvent faits au moment de **l'étude de faisabilité**
- Les minières sont **dépendantes des prix sur les marchés mondiaux**
- Le cycle d'exploitation minière a des **impacts locaux importants (sur l'environnement et les communautés)**

Des défis et des enjeux pour l'adoption de l'innovation en lien avec les caractéristiques économiques inhérentes à l'industrie minière

- Des enjeux de disponibilités rapides des véhicules électriques
- Des enjeux d'accès à de l'électricité verte
- Des enjeux liés à l'éloignement géographique

**CONTEXTE ORGANISATIONNEL DE L'INDUSTRIE MINIÈRE
QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS**

- L'incertitude et les risques liés aux technologies émergentes non éprouvées dissuadent les investissements
- Les compagnies minières sont généralement averses aux pertes
- Les projets pilotes sont importants pour réduire l'incertitude associée aux technologies innovantes
- Les équipes opérationnelles sont généralement résistantes aux changements
- La culture d'apprentissage et le partage de savoir interdisciplinaire sont importants pour mitiger l'aversion aux pertes
- La communication et la collaboration aux différents niveaux de l'organisation sont importantes pour favoriser une culture d'innovation
- La structure organisationnelle amène de la distance entre les opérations et la direction stratégique
- Les décisions sont prises à plusieurs niveaux de la chaîne décisionnelle
- Les systèmes de performance et de reconnaissance sont axés sur l'efficacité et l'efficience au détriment de la créativité et l'apprentissage
- Un management stratégique qui priorise une approche par projet, centrée sur la rentabilité, plutôt qu'une approche globale

Des défis et des enjeux pour l'adoption de l'innovation en lien avec les ressources humaines dans l'industrie minière

- Enjeux liés à une main-d'œuvre vieillissante : difficulté liée au transfert de connaissance et résistance aux changements
- Enjeux de rétention de la main-d'œuvre
- Besoin de formation aux nouvelles technologies pour augmenter leur acceptabilité
- Enjeux d'attraction de main-d'œuvre
- De nouvelles compétences recherchées, mais en concurrence avec d'autres secteurs industriels et d'autres pays
- Un besoin de connaissance et de compétence à l'interne comme prérequis à l'adoption d'innovations

**ÉCOSYSTÈME DE L'INDUSTRIE MINIÈRE
QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS**

Gouvernement

Investissement gouvernemental dans la R&D (Recherche et Développement)

Équipementiers

- une désintégration verticale des grandes entreprises minières et un nouvel écosystème d'innovation alimenté principalement par les METS (Mining Equipment & Technology suppliers)

<ul style="list-style-type: none"> En lien avec la transformation numérique : dynamique de concurrence élargie, dépendance des minières aux fournisseurs, compétition pour le contrôle des connaissances, propriété des données
<p>Consultants impliqués dans les rapports techniques NI 43-101</p> <p>Les impacts des innovations sur les flux monétaires sont généralement peu détaillés ;</p>
<p>Investisseurs</p> <ul style="list-style-type: none"> Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière
<p>UN CONTEXTE ESG QUI INFLUENCE L'ADOPTION D'INNOVATIONS</p>
<ul style="list-style-type: none"> Les critères ESG ne semblent pas ou peu pris en compte dans l'analyse financière. Les avantages financiers de la divulgation ESG ne sont pas mesurables. Il n'y a pas de consensus scientifique sur les liens à faire entre une bonne performance ESG et une bonne performance financière. L'influence du prix des commodités sur l'opportunité d'exploiter des gisements jusqu'alors non rentables pourrait engendrer des impacts sur les facteurs ESG. En dépit de l'importance croissante des critères ESG pour diverses parties prenantes au-delà des investisseurs, il reste une incertitude entourant les incitatifs pour les entreprises minières à adopter des pratiques ESG robustes. Il y a une nécessité d'aligner les stratégies et opérations du secteur minier avec les exigences ESG et d'examiner comment cela influe sur les décisions d'investissement, les stratégies d'innovation et les futures méthodes de travail.

Deux facteurs majeurs entravent principalement l'innovation dans le secteur minier.

En ce qui concerne les caractéristiques inhérentes à l'industrie, l'aspect cyclique de l'industrie minière est un facteur prépondérant. Les fluctuations cycliques affectent sensiblement le comportement des entreprises minières en matière de prise de risque. En période de ralentissement économique, les entreprises ont tendance à minimiser leurs investissements dans les nouvelles technologies, privilégiant la réduction des coûts pour faire face à la pression sur les marges. À l'inverse, en période de croissance, même si des ressources financières sont disponibles pour l'innovation, l'accent est souvent mis sur l'augmentation de la production en réponse à la demande du marché, reléguant l'innovation au second plan.

Sur le plan organisationnel, l'aversion aux pertes est un facteur central qui influe sur les décisions d'investissement en innovation. Bien que le secteur minier ait bien compris les avantages potentiels de l'innovation pour améliorer l'efficacité opérationnelle et répondre aux exigences croissantes de durabilité, les aspects financiers continuent de primer sur les considérations extrafinancières. Cette hiérarchie des priorités s'explique en partie par la nécessité de maintenir des objectifs de rendement. La recherche d'un équilibre entre la réduction des risques existants, pouvant être atténués par l'adoption de nouvelles technologies, et l'émergence de nouveaux risques liés à ces innovations est au cœur de la dynamique. Cette réalité doit être analysée à la lumière de l'aversion aux pertes, un trait de caractère partagé par de nombreux acteurs de l'industrie. Le risque est généralement très bien géré au sein des minières, mais tout risque nouveau est souvent perçu comme

inacceptable compte tenu des contraintes financières et opérationnelles déjà présentes. Il pourrait être bénéfique d'explorer des approches qui permettraient d'affiner l'évaluation de la probabilité d'occurrence des risques, tout en adoptant une perspective à plus long terme, davantage compatible avec les critères ESG et les objectifs de durabilité.

D'ailleurs, il est essentiel de prendre en considération l'impact croissant de la prise en compte des critères ESG (Environnement, Social, Gouvernance) et de la divulgation, qui est en train de devenir un élément incontournable. Bien que l'intégration de ces critères demeure limitée dans l'analyse financière, l'alignement des stratégies et des opérations de l'industrie minière avec les exigences ESG constitue désormais un enjeu majeur pour l'avenir. L'acceptation sociale des projets miniers revêt une importance capitale pour le secteur, car elle est souvent un préalable pour obtenir la licence sociale d'opérer. Les relativement bons niveaux d'acceptabilité sociale ressortant des données du Baromètre CIRANO pour ce secteur sont encourageants. Cependant, à la lumière de l'intérêt croissant pour les matériaux critiques et stratégiques, ainsi que de l'arrivée d'acteurs internationaux, l'industrie minière québécoise semble être en pleine expansion au Québec. Par conséquent, de nouveaux défis en matière d'acceptabilité sociale pourraient émerger. Il en va donc de la responsabilité de l'ensemble de la filière de répondre aux plus hauts standards de transparence, en s'engageant notamment avec des initiatives telles que VDMD ou Eco-Logo. En ce qui concerne l'aspect environnemental, les procédures d'évaluation environnementale ont déjà pour objectif de veiller à ce que les entreprises minières maintiennent de bonnes performances environnementales. Toutefois, la montée en puissance de la divulgation extrafinancière pourrait devenir un défi de taille pour les sociétés minières, car elles seront tenues de s'y conformer rapidement, en réponse aux exigences croissantes de leurs bailleurs de fonds. Ces derniers sont de plus en plus soumis à une pression considérable pour financer des projets respectueux de l'environnement. Bien que certaines entreprises soient déjà prêtes à relever ce défi, d'autres préfèrent attendre de connaître les exigences spécifiques, car la mise en conformité nécessite des ressources importantes.

Pour atténuer les contraintes précédemment évoquées, plusieurs mesures peuvent être prises, notamment la réalisation de tests pilotes, une coopération plus étroite avec les équipementiers pour partager les risques et les coûts liés à l'innovation, ainsi qu'une collaboration renforcée entre les différents niveaux de direction au sein des entreprises minières. Cela contribuerait à promouvoir une culture de l'innovation et à faciliter l'acceptation des nouvelles pratiques et technologies.

Pour finir, il est essentiel de faire ressortir, en marge de tous les autres facteurs déjà évoqués, un défi majeur pour le Québec en lien avec l'accès à une énergie propre en quantité suffisante. En effet, une des principales innovations discutées dans le secteur minier concerne l'électrification des véhicules et cette transition des véhicules diesel vers des véhicules électriques va nécessiter une alimentation électrique importante. Le Québec dispose d'un avantage considérable en ayant un approvisionnement électrique très peu émetteur de carbone. Néanmoins, de nombreuses inquiétudes sont présentes au sein du secteur minier quant à un manque non seulement d'énergie, mais également de puissance au Québec dans un avenir très rapproché. Les capacités actuelles d'approvisionnement en électricité ne suffiront donc pas à répondre à la demande croissante des ménages et des entreprises. Cette incertitude quant au fait que les sociétés minières n'auraient peut-être pas accès à suffisamment d'électricité pour leurs projets, ce qui s'ajoute à toutes les autres incertitudes évoquées tout au long de ce rapport, pourrait freiner l'adoption de technologies plus respectueuses de l'environnement par les entreprises minières.

ANNEXES

14 Annexes

14.1 Annexe 1 : Principales technologies de pointe dans l'industrie minière : description et évaluation des coûts et des bénéfices

L'analyse des données de Statistique Canada provenant de l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise vient de montrer que le secteur minier semble introduire moins d'innovations que le secteur manufacturier au Québec. Il est intéressant de noter que cette constatation s'aligne avec une perception bien ancrée de l'industrie minière en tant que domaine traditionnellement réticent au changement sur le plan technologique, comme l'ont également souligné des travaux récents de Gruenhagen & Parker (2020) ou encore de Ediriweera & Wiewiora (2021).

Avant d'identifier des pistes pour tenter de mieux comprendre ce phénomène, il est important de faire un portrait des tendances technologiques au sein du secteur minier.

La présente section fait donc état de la littérature sur les innovations technologiques récentes (2000-2023) dans l'industrie minière et vise à analyser et à synthétiser les connaissances actuelles concernant les bénéfices et les coûts liés à l'adoption de ces diverses technologies. Les innovations au potentiel disruptif sont priorisées vu la disponibilité des données quantitatives. En examinant les estimations de coûts et de bénéfices des innovations tirées de la littérature scientifique et des rapports de l'industrie, cela permettra de mieux comprendre l'impact de ces technologies sur la valeur actualisée nette (VAN) des projets miniers et ainsi d'éclairer les décisions stratégiques des acteurs concernés. Une simulation financière est d'ailleurs proposée dans le chapitre 5.

Pour cette revue de littérature, nous avons utilisé Google Scholar ainsi que l'outil de recherche SOFIA, commun à toutes les bibliothèques universitaires québécoises avec divers mots-clés. Le processus de recherche comprenait trois étapes : une première étape de filtrage contenant : « *mine* » OR « *mining* » OR « *underground mining* » et NOT « *data mining* », « *process mining* », « *text mining* » afin d'exclure les articles portant sur le minage de données ou de procédés ; une deuxième étape de filtrage comprenait les mots-clés reliés aux différents types d'innovation²¹, puis une troisième étape de filtrage par

²¹ Liste des mots-clés utilisés distinctivement à la deuxième étape de filtrage : «Autonomous», «IoT OR Internet of Things», «AI OR artificial intelligence OR ML OR machine learning», «Remote», «Robotic», «Augmented Reality OR virtual reality», Automation OR automated», «Electrification», «digital twinning», «Wearable technology», «Smart», «communication», «digital».

critères priorisant les analyses coûts-bénéfices ou les rapports de l'industrie susceptibles de fournir des données quantitatives²².

14.1.1 Bref tour d'horizon des technologies émergentes dans le secteur minier

La littérature scientifique et les rapports de l'industrie font état de trois grandes catégories de technologies susceptibles de transformer le secteur minier : la transformation numérique, l'automatisation et l'électrification. Une étude qualitative du Conseil des ressources humaines de l'industrie minière au Canada réalisée en 2019 auprès de 125 intervenants de l'industrie minière canadienne ayant une connaissance directe et pertinente du contexte de l'industrie montre d'ailleurs que les innovations les plus fréquemment citées étaient les données et l'analyse (40 %) et l'automatisation (40 %), suivies des véhicules électriques et alimentés par batterie (32 %) (Conseil RHIM, 2020).

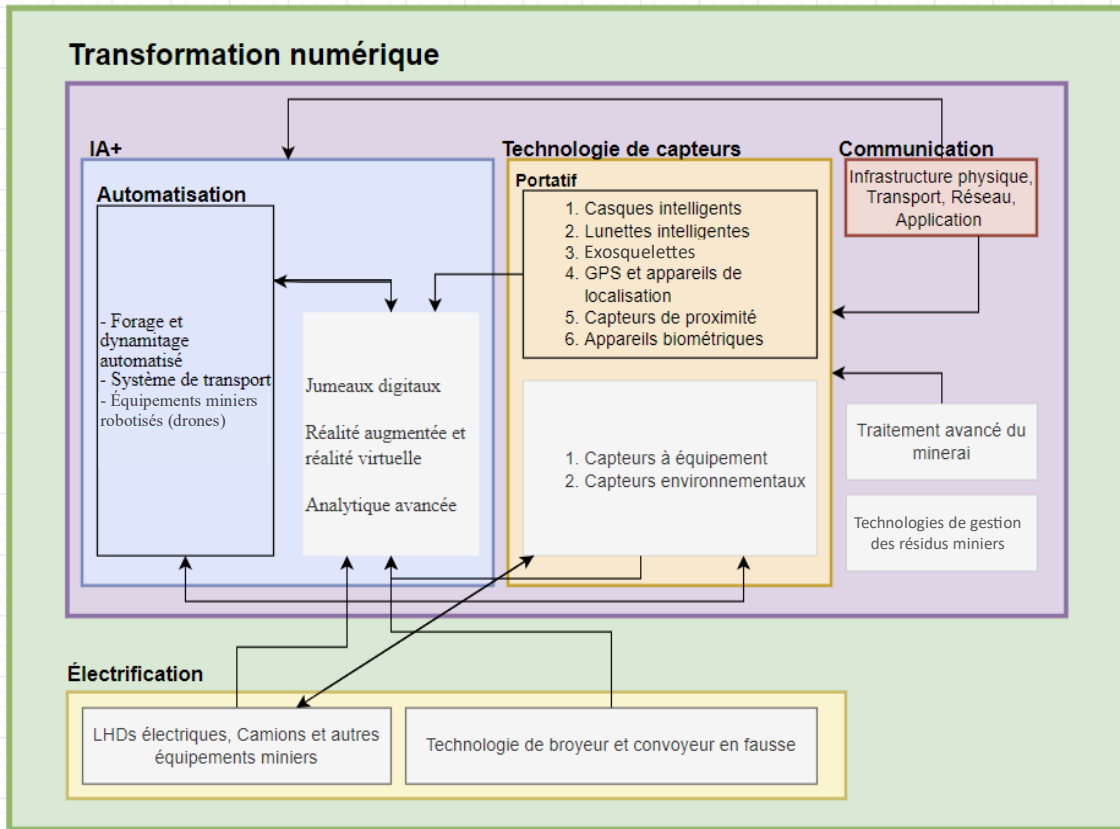
Bien entendu, l'automatisation est un élément clé de la transformation numérique. Par exemple, dans l'industrie minière, l'automatisation est souvent utilisée pour optimiser les opérations, réduire les risques pour les travailleurs et améliorer l'efficacité. Cependant, l'automatisation n'est qu'un aspect de la transformation numérique plus vaste, qui englobe également la collecte de données, l'analyse avancée, la connectivité et d'autres technologies numériques pour améliorer l'ensemble de l'entreprise.

La schématisation des technologies dans l'industrie minière met en évidence le potentiel d'innovation dans l'industrie minière, avec des technologies qui transforment radicalement la manière dont les ressources minérales sont extraites, transformées et gérées, tout en contribuant à une exploitation plus durable et efficace.

²² Liste des mots-clés utilisés distinctivement à la troisième étape de filtrage : « cost OR benefit OR analysis», «impact»

Figure 26 : Liens et interdépendance technologique de l'industrie 4.0

Industrie 4.0



Source : Auteurs

Déjà en 2019, pour l'Institut National des mines du Québec (INMQ), c'était le passage au numérique qui était mis de l'avant. On parlait de « capacité à connecter en tout temps tout objet comme toute personne de transmettre des données et de les rendre accessibles dans l'immédiat sans enjeu de distance, d'archivage et de sécurité ». L'INMQ définit le concept d'agilité minière, l'objectif ultime de cette transition à l'industrie 4.0, qui passera par quatre éléments (INMQ, 2019) :

- « La mine intelligente est associée à l'acquisition de données et à la capacité d'utiliser cette information pour la prise de décision. »
- « La mine numérique qui permet la mise à l'essai de différents scénarios pour optimiser les processus. »
- « L'automatisation des opérations assurant une plus grande prédictibilité et reproductibilité des résultats. »
- « L'intégration des opérations dans un système global et centralisé tout au long de la chaîne de valeur. »

Cette transition englobe donc beaucoup de concepts et d'applications différentes, que ce soit dans l'exploration de gîtes miniers, la gestion du risque minier, l'extraction du minerai, son transport et enfin son raffinage. Malheureusement, il n'y a que peu de recherches sur les impacts sociaux et économiques de l'implémentation de telles technologies.

Nous illustrons donc ici à travers quelques articles scientifiques des éléments à prendre en compte dans l'évaluation des coûts et des bénéfices de l'implantation de technologies innovantes dans le domaine des mines (en se concentrant sur la phase d'extraction). Les exemples ne sont pas nécessairement propres au Québec compte tenu d'un manque de littérature à cet effet, mais des extrapolations peuvent être faites en ayant comme variable de contrôle certains autres facteurs qui peuvent différencier le Québec de certaines régions étudiées.

14.1.2 Disponibilité et accès aux données

Une part importante de l'innovation dans l'industrie minière se fait de façon incrémentale, sous forme de résolution de problème au niveau opérationnel et d'organisation de la production dans une logique de réduction des coûts et d'efficacité. Un tel type d'innovation est difficile à quantifier (Steen et coll., 2018). De plus, une innovation peut être intégrée à une chaîne de production complexe et interreliée, limitant la capacité à mesurer et quantifier l'impact de cette innovation.

Globalement, il est ainsi relativement difficile d'obtenir des estimations précises des bénéfices, des dépenses en capital (CAPEX) et des dépenses d'exploitation (OPEX) liées à l'adoption de nouvelles technologies dans des projets miniers. Bien que les bénéfices sur la productivité, les impacts environnementaux et la sécurité des travailleurs soient davantage rapportés dans la littérature scientifique et dans les rapports de l'industrie, les informations sur les différents coûts engendrés par l'implantation de nouvelles technologies s'avèrent particulièrement difficiles à obtenir. Plusieurs facteurs sont en cause. D'abord, un historique limité d'études de faisabilité des différentes technologies limite l'accès à des données de qualité. De plus, les nouvelles technologies dans l'industrie minière peuvent être complexes et relever de processus interreliés. Elles peuvent impliquer une variété de composantes, telles que du matériel, des logiciels et des processus opérationnels. Estimer avec précision les coûts de chaque composante peut être difficile, surtout lorsqu'ils sont interdépendants. L'incertitude autour de la performance est une autre contrainte limitant l'accès aux données. La performance des nouvelles technologies dans l'industrie minière est sujette à énormément d'incertitude et est difficile à prévoir. Au niveau géographique, l'industrie minière opère dans différentes régions géographiques avec des coûts de main-d'œuvre, des cadres réglementaires et des

conditions environnementales variables. Ces facteurs peuvent avoir un impact significatif sur les estimations de CAPEX et d'OPEX et peuvent rendre difficile la généralisation des estimations à travers différentes régions. En ce qui concerne la confidentialité, les sociétés minières peuvent être réticentes à partager des informations sur les estimations de CAPEX et d'OPEX pour les nouvelles technologies pour des raisons stratégiques. Elles peuvent considérer ces informations comme confidentielles et hésiter à les divulguer à des concurrents ou à d'autres parties prenantes de l'industrie.

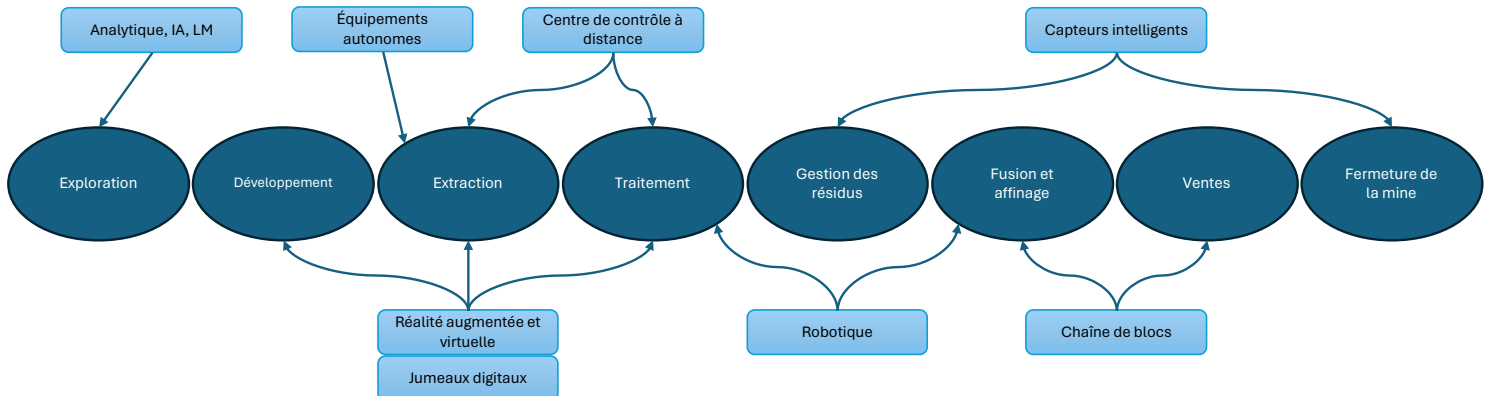
Dans l'ensemble, l'obtention d'estimations précises de CAPEX et d'OPEX pour les nouvelles technologies dans l'industrie minière peut être difficile en raison de la complexité des technologies, de l'incertitude entourant leur performance et de la sensibilité commerciale des informations.

14.1.3 La transformation numérique dans l'industrie minière

L'ère du numérique a ouvert la voie à une transformation profonde et novatrice dans de nombreux secteurs industriels dont le secteur minier. Cette révolution numérique offre des perspectives prometteuses pour améliorer l'efficacité opérationnelle, la sécurité des travailleurs et la durabilité environnementale des activités d'exploitation. Les technologies de l'information et de la communication, telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), l'automatisation, la robotique et l'analyse des données massives (Big Data), sont au cœur de cette transformation. La transformation numérique agit réellement comme un catalyseur de l'innovation.

Il ne fait aucun doute que la transformation numérique de l'industrie connaît déjà et continuera d'avoir un impact sur l'industrie minière. Bien que, selon certains experts, le potentiel de la transformation numérique demeure largement sous-exploité dans l'industrie minière vis-à-vis d'autres industries, cette nouvelle réalité est déjà bien au centre des préoccupations des décideurs. En effet, parmi 151 hauts dirigeants de minières, 90 % disent avoir mis de l'avant la transformation numérique au centre du processus décisionnel sous forme de stratégies d'affaires (Sánchez et Hartlieb 2020). En effet, ces avancées technologiques apportent des bénéfices importants aux différents stades de la chaîne de valeur minière et peuvent permettre, par exemple, aux entreprises minières d'optimiser leurs processus, de réduire les coûts, d'améliorer la prise de décision et de renforcer leur compétitivité sur le marché mondial.

Figure 27 : Technologies de transformation numérique aux différents stades de la chaîne de valeur minière



Source : Auteurs

La figure ci-dessus illustre les technologies de la transformation numérique aux différents stades du processus de développement minéral. Collectivement, ces technologies suscitent de plus en plus d'intérêt et certaines d'entre elles sont déjà en cours d'exploitation (les camions autonomes, par exemple).

Cependant, le plein potentiel de la transformation numérique reste à réaliser, et la capacité des innovations associées à contribuer de manière significative à la productivité n'est toujours pas prouvée hors de tout doute. Steen et coll. (2018) soulèvent à ce titre que mettre à profit les technologies numériques est un processus qui prendra du temps à se matérialiser et que de nombreux défis demeurent : (1) les technologies numériques peuvent générer des gains de productivité importants, mais seulement si la technologie améliore la coordination de la production tout au long de la chaîne de valeur et de la chaîne d'approvisionnement ; (2) l'application de la technologie numérique à des points spécifiques de la chaîne de valeur aura un impact limité. La numérisation et la coordination d'un réseau d'approvisionnement intégré nécessitent de nouvelles capacités commerciales et de gestion ; (3) l'accumulation de données et d'expérience prendra du temps. La numérisation d'une opération minière et la création d'un nouvel écosystème industriel autour de la technologie numérique sont des projets à long terme.

14.1.3.1 Quelques exemples d'évaluation des bénéfices de la transformation numérique

La transformation numérique de la chaîne de valeur minière permet d'importants gains en efficacité et une amélioration de la productivité. Les technologies numériques permettent, par exemple, de réaliser des expériences virtuelles dans les mines, éliminant ainsi les risques liés aux expériences réelles, tout en facilitant la collaboration entre les parties prenantes internes et externes. L'utilisation de la simulation et de la visualisation

offre la possibilité de recueillir des informations essentielles sur les effets en cascade des nouvelles technologies dans des systèmes technologiques complexes, tout en permettant aux parties prenantes de contribuer au processus de conception. Hazrathosseina & Moradi Afrapoli (2023) présentent, par exemple, les bénéfices du jumeau digital (*digital twin*) dans les mines. Cette technologie permet notamment, en créant une réplique virtuelle d'un projet minier, de simuler et d'optimiser les opérations minières en temps réel et de planifier des scénarios hypothétiques. Le jumeau numérique se met à jour grâce à diverses sources de données provenant de capteurs installés sur les équipements, des logiciels de gestion et des systèmes de surveillance. Les auteurs citent une étude de Du Preez (2021) indiquant que l'implantation du jumeau numérique par Exxaro et Spath32 (mines de charbon) et Afrisam (*aggregate quarry*) ont permis d'améliorer la production des camions de 33 %. Toujours au niveau de l'utilisation du jumeau numérique, General Electric observe pour une de ses raffineries une hausse de 10 % de la production, des économies d'énergie pour la mine de 2,5 % et une amélioration de 3,3 % de l'extraction de minerai de fer (Hazrathosseini & Afrapoli, 2023). Ces études de cas indiquent également une réduction de 43 % des accidents dus à la vitesse des véhicules.

Un article de Resource World mentionne des gains potentiels de production de 20-25 % dus à l'utilisation de l'IA pour prédire et prescrire les besoins en maintenance des équipements (Resource World, 2022).

Une application plus récente concerne la mine souterraine d'or de Cracow en Australie. Elle vient en effet de renouveler son contrat avec Minnovare pour un logiciel de forage, Production Optimiser, qui augmente grandement l'efficacité de la planification du forage, mais aussi sa précision. Les impacts positifs de ce logiciel seraient nombreux. Non seulement la précision supplémentaire aurait réduit de 62 % les coûts dus à de la dilution non prévue, ce qui représente 3,2 millions de dollars US, mais le Production Optimizer a aussi permis de récolter 5,9 millions de dollars US d'or supplémentaires lors de la première année d'implémentation. En outre, la précision supplémentaire acquise grâce au logiciel, permet d'atteindre des dépôts de minerai jusqu'à présent trop risqués pour l'exploitation. Extraire cette quantité d'or, d'une valeur de 42 millions de dollars US, a permis à la compagnie de faire un profit de 23 millions de dollars US. L'utilisation de ce logiciel a aussi l'avantage d'augmenter la durée de vie de la mine. Dans une autre mine en Australie, les résultats sont encore plus marquants : on y note une augmentation de 31 % de la productivité du forage et une augmentation de la production d'or de 7 %, soit environ 5.5 millions de dollars US de profit supplémentaire (Morton, 2022).

Durant-Whyte et coll. identifient plusieurs exemples d'application de l'analytique de données en contexte minier (Durrant-Whyte et coll., 2015). Dans une étude de cas d'une mine d'or, l'analytique de données a permis d'optimiser le processus d'extraction par

lixiviation et d'augmenter le rendement moyen de 3-4 % en l'espace de trois mois. Cette augmentation du rendement s'est traduite par une amélioration durable du bénéfice annuel de 10 à 20 millions de dollars, sans nécessiter d'investissements supplémentaires. L'implantation de l'IA et de l'analytique avancée pour prévoir les besoins de maintenance de sa flotte de camions a permis à une grande mine à ciel ouvert en Amérique du Nord d'économiser 12 % en coûts de main-d'œuvre, services et pièces de rechange en plus d'améliorer la disponibilité de 5 %. Les auteurs mentionnent finalement la seconde phase d'un projet d'exploitation de cuivre dans lequel la combinaison de l'automatisation, de l'analytique avancée, des capteurs robotiques et de la modélisation 3D compte augmenter la productivité de la mine de près de 30 % en plus d'améliorer la sécurité. Alors que la mine implémente ces nouvelles technologies pour l'horizon 2025, la minière entrevoit un potentiel de réduction des coûts d'opération de près de 30 % par rapport à un projet d'exploitation de cuivre en sol profond traditionnel (Durrant-Whyte et coll., 2015).

BHP, une compagnie minière australienne a créé en 2017 un Centre d'Excellence en Maintenance dont les travaux ont jusqu'à présent permis de réduire les erreurs dans les données de base, d'améliorer les délais et la précision de la planification et de réduire les coûts liés à la durée de vie des actifs. Pour ses camions de transport Liebherr T282, en standardisant les améliorations de l'entretien, en mettant en œuvre des activités préventives, BHP prévoit réduire ses coûts de 18 % sur la durée de vie restante de la flotte (BHP, 2017). BHP prévoit même que la standardisation de la gestion de ses mines pourrait réduire de 20 % leurs coûts de gestion (Jang & Topal, 2020).

Bien que l'engouement à court terme pour la technologie numérique repose sur les réductions de coûts, les technologies numériques ont un potentiel beaucoup plus large en tant que catalyseurs de l'innovation, notamment dans les domaines de la simulation, de la modélisation, de la prise de décision en temps réel et de la résolution collaborative de problèmes. L'automatisation avancée favorisera des solutions systémiques et une efficacité améliorée de l'extraction au traitement du minerai.

Il est important de noter que l'on ne trouve pas d'information dans la littérature concernant le coût d'implantation et les rapports de l'industrie quant aux différentes technologies liées à la transformation numérique de la chaîne de valeur minière. Tel que mentionné, les nouvelles technologies dans l'industrie minière peuvent être complexes relevées de processus interreliés. Elles peuvent impliquer une variété de composants, tels que du matériel, des logiciels et des processus opérationnels. Estimer avec précision les coûts de chaque composant peut être difficile, surtout lorsqu'ils sont interdépendants.

14.1.4 L'automatisation dans l'industrie minière

L'automatisation est l'un des domaines les plus prometteurs pour l'industrie minière 4.0. Au cours de la dernière décennie, l'automatisation des véhicules et des systèmes de traitement du minerai a connu des avancements significatifs. L'automatisation s'observe principalement au niveau des *Load-Haul Dumpers (LHD)*, des camions de transport (*Hauling trucks*) et de certains systèmes de forage. Ces différentes étapes du cycle d'exploitation minière représentent le potentiel le plus important au niveau des gains en productivité et de l'économie des coûts. L'automatisation de ces technologies présente des bénéfices tant au niveau de la productivité qu'en ce qui traite les aspects environnementaux et la sécurité des mineurs.

14.1.4.1 Quelques exemples d'évaluation des bénéfices de l'automatisation

14.1.4.1.1 Une augmentation de la productivité

Sandvik présente des gains de 10 % de productivité dans la mine de Lz5 grâce à l'automatisation des camions de transports (*hauling trucks*) et des gains de 35-40 % dans la mine de Hecla's Casa Berardi au Québec (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2018, 2021). Moreau et coll. ont observé une augmentation de 35 % (4050 t/jour) de la productivité dans une mine canadienne grâce à l'automatisation des *Load-Haul Dumpers* (Moreau et coll., 2020). Les auteurs mentionnent également que ces gains de 35 % peuvent être appliqués aux camions de transports et aux installations de forage puisque le déchargement du minerai constitue le goulot d'étranglement du processus de production. Le tonnage de minerai dépend de la productivité des LHDs et non des camions ou des appareils de forage.

Dans un modèle de simulation interactif, Parreira observe qu'un système de transport autonome peut augmenter la productivité de 21,3 % grâce à l'augmentation de son utilisation (Parreira, 2013). En Australie occidentale, BHP a recouru à l'automatisation des foreuses autonomes et note un gain de productivité de 25 % (BHP, 2019). La compagnie minière britannique Rio Tinto a analysé l'augmentation de productivité de mines de fer en Australie grâce à l'implémentation de systèmes de transport autonomes et de systèmes de forage autonomes. Les augmentations seraient de 11 et 26 % respectivement (Rio Tinto, 2018).

Enfin, Knights et Yeates mentionnent l'exemple de l'automatisation des LHD dans une mine d'Australie ayant permis une amélioration de 23 % des rendements (Knights & Yeates, 2021).

14.1.4.1.2 Des économies de coûts en maintenance et équipement

L'automatisation des technologies minières permet également d'importantes économies de coûts. Fortescue Metals Group, une minière australienne, aurait réduit ses coûts de production par tonne métrique humide de minerai de fer de 50 % (de 27,15 USD/wmt à 13,11 USD/wmt) par l'automatisation et la numérisation de ses mines, en l'espace de quatre ans (2015 à 2019) (Jang & Topal, 2020). Dans un scénario de *zero entry mining* où l'ensemble de l'activité minière en sous-sol serait automatisé, Knights et Yeates envisagent un niveau des OPEX à 76 % de celui d'un processus d'extraction par machinerie conventionnelle (Knights & Yeates, 2021). Les auteurs concluent également qu'en tenant compte de l'augmentation des CAPEX, les coûts totaux sont réduits d'environ 30 %. Sans mentionner de chiffres exacts, les auteurs mentionnent aussi les économies de coûts liés au processus de réglementation de permis concernant les standards de sécurité (*intrinsic safety standards*) des équipements électroniques. Moreau et coll. mentionnent un besoin moindre en équipement et en maintenance de l'ordre de 15 % à 30 % dû à la diminution de la fréquence d'accidents. Ils mentionnent également des économies de carburants diesel de 30 % (0,27 L/t à 0,19 L/t) pour les équipements miniers (LHDs, camions, foreuse) (Moreau et coll., 2020). BHP et Sandvik observent une diminution des coûts de maintenance de 40 % et de 30 % respectivement (BHP, 2019; Sandvik Mining and Rock Solutions, 2018). Dans la mine d'or entièrement automatisé de Syama au Mali, Resolute Mining a vu son coût de production passer de 881 US\$ à 746 US\$ l'once, une baisse de 15 %. Parreira conclut qu'un système autonome permet une économie de 6,1 % en litres par tonne extraite (Parreira, 2013). Cosby et coll. mentionnent une baisse observée pour deux cas de figure de la consommation de carburant de 10 % à 15 % et une diminution des coûts de maintenance de 8 % (Cosby et coll., 2016). Hyder et coll. observent que BHP et RioTinto ont généré des économies en OPEX de l'ordre de 15 % grâce aux camions autonomes (Hyder et coll., 2019). Enfin, Costa & Silva affirment que l'utilisation de LHD automatisés permet de réduire les besoins en ventilation de 33 % à 60 % (Costa & Silva, 2020). Kansake et coll. font état du taux de roulement du personnel particulièrement élevé dans l'industrie minière (40 %). L'automatisation se veut une avenue de réduction des coûts de formation de la main-d'œuvre sans compter la réduction des besoins en main-d'œuvre pour opérer l'équipement automatisé (Kansake et coll., 2019).

14.1.4.1.3 Des bénéfices pour l'environnement et la santé et la sécurité des travailleurs

L'automatisation des équipements miniers s'accompagne également de bénéfices pour l'environnement et la santé des travailleurs. Grâce aux économies de carburant, d'importantes réductions des GES peuvent être réalisées. Moreau et coll. (2020)

montrent, par exemple, que les émissions de GES diminuent de 18,3 % par l'automatisation grâce aux économies de carburants et de la diminution de durée de vie de la mine²³ (27 %). De plus, l'indice de toxicité unitaire comparative (*CTUh*) a diminué de 19,2 %, représentant onze cas de maladies de moins dus aux émanations chimiques du processus minier (Moreau et coll., 2020). Randgold Resources a observé une diminution de 29 % du taux d'incidents au travail depuis l'implantation de technologies autonomes dans ses projets miniers en Afrique (Mining.com, 2018).

14.1.4.2 Quelques exemples d'évaluation des coûts de l'automatisation

L'automatisation entraîne d'importants coûts financiers pour les entreprises minières, en plus de soulever des préoccupations quant aux impacts économiques et sociaux générés par son incidence sur la main-d'œuvre. Le Conseil des ressources humaines de l'industrie minière a d'ailleurs réalisé un rapport très complet (Conseil des ressources humaines de l'industrie minière (Conseil RHIM), 2020) au sujet de l'incidence de l'innovation et de l'automatisation sur la main-d'œuvre de l'industrie minière canadienne. En particulier, l'étude analyse « la vulnérabilité de 120 professions de l'industrie minière, ainsi qu'une mise en correspondance des compétences et des professions pour estimer les changements éventuels de la demande pour certaines compétences de la main-d'œuvre » (Conseil RHIM, 2020).

14.1.4.2.1 CAPEX

Des dépenses en capital importantes sont nécessaires en début de projet. Parreira fait état des CAPEX pour l'implantation de neuf camions automatisés. Les coûts d'acquisition sont de 45 M\$ (5 M\$ par camion) en plus de 6,6 M\$ pour les infrastructures et de 0,5 M\$ en provisions pour problèmes en début de projet pour un total de 52,2 M\$²⁴. L'auteure note que le prix de 5 M\$ par camion automatisé se compare 4 M\$ par camion manuel, une différence de 20 %. Cette estimation est cohérente avec Knights & Yeates qui mentionnent une augmentation des CAPEX de l'ordre de 20 % (Knights & Yeates, 2021).

²³ La productivité accrue réduit la durée de vie de la mine puisque le minerai est extrait plus rapidement. Il y a donc moins d'émissions sur l'ensemble de la durée de vie.

²⁴ Dollars courants 2015

14.1.4.2.2 OPEX et coûts additionnels

Au niveau des coûts d'opération, Parreira indique une économie d'environ 8 % par année pour neuf camions automatisés par rapport au scénario équivalent en production pour dix camions manuels (Parreira, 2013)²⁵. Bellamy & Pravica rapportent d'autres coûts additionnels aux équipements automatisés, soit les coûts en infrastructure de support comme des radars, GPS, et salle de coordination de ces équipements. Les auteurs chiffrent ces besoins à 280 000 A\$ (Bellamy & Pravica, 2011)²⁶²⁷. Les auteurs estiment également une diminution de la durée de vie des pneus des véhicules autonomes de 25 % due à l'impossibilité pour les véhicules d'éviter les roches et les débris. Ces coûts se chiffrent à 3,6M A\$ par année. L'étude datant de 2011, les avancements technologiques récents ont possiblement éliminé ces défauts d'opération.

14.1.4.2.3 Autres impacts socio-économiques de l'automatisation

Une des répercussions principales de l'implantation d'équipements automatisés dans les projets miniers est le remplacement de la main-d'œuvre. Bien que cet aspect permette aux entreprises minières d'économiser des coûts en capital humain, cet enjeu affecte grandement l'acceptabilité sociale des projets miniers et peut nécessiter davantage de coûts pour pallier la baisse de l'emploi et des retombées économiques indirectes pour les communautés et les gouvernements (Cosbey et coll., 2016 ; Mining.com, 2018). Par exemple, Paredes & Fleming-Muñoz mentionnent les estimations de Alphabet (2018) selon lesquelles 10 000 emplois dans les mines de charbon du Queensland en Australie pourraient être remplacés dans un futur rapproché, soit 40 % de la main-d'œuvre actuelle (Paredes & Fleming-Muñoz, 2021). Cosbey et coll. citent McNab et coll. (2013), étude selon laquelle l'introduction d'équipements entièrement autonomes « réduirait la main-d'œuvre d'une mine de fer à ciel ouvert typique d'environ 30 à 40 % ». Les auteurs citent également un rapport de Accenture (2010), qui évalue l'impact de l'automatisation de

²⁵ Voir tableau 2 en Annexe

²⁶ «While commercially sensitive, a broad estimate is possible using the retail cost of computing working memory, which sold for \$A 1.20 per megabyte of RAM in 2008. If an onboard system uses one terabyte of memory, it would cost \$A 120,000 per unit plus another \$A 100,000 for the civil works associated with pit communication infrastructure. Included with this is the retail price of Mine Surveyors Differential GPS at about \$A 50,000 (accurate to 1 cm) plus a radar unit costing approximately \$A 10,000. This adds to an amount of \$A 280,000, just \$A 127,216 more than the annual wage and cost of a haul truck driver.»

²⁷ Dollars courants 2011

trois types d'équipements (camions, bouteurs et foreuses), suggérant que l'automatisation pourrait réduire le nombre d'opérateurs dans les mines à ciel ouvert jusqu'à 75 %. De façon cohérente avec de telles estimations, Bellamy & Pravica font comme hypothèse dans leur modélisation une réduction de la main-d'œuvre de 268 à 66 employés, soit une réduction de 75 % de la main-d'œuvre de camionneurs (Bellamy & Pravica, 2011). Bien que plus complexe à chiffrer pour un projet minier particulier, le remplacement de la main-d'œuvre entraîne des baisses de revenus en taxes et en impôts pour les gouvernements en plus d'impacter négativement le niveau d'accessibilité sociale lors de la période d'approbation. Cosbey et coll. estiment à ce titre en agrégat l'impact sur les revenus fonciers de l'automatisation au niveau national entre 31 M USD et 74 M USD (Cosbey et coll., 2016).

14.1.5 L'électrification dans l'industrie minière

L'industrie minière mondiale fait face à une pression croissante de la part des régulateurs, des investisseurs et des clients pour réduire les émissions de carbone de leurs opérations, et la plupart des grandes entreprises du secteur ont déjà fixé des objectifs ambitieux pour atteindre leurs cibles de réduction d'émissions de CO₂. L'électrification est un des aspects clés de cette transition vers un secteur minier décarboné.

14.1.5.1 Quelques exemples d'évaluation des bénéfices de l'électrification

L'utilisation de batteries pour les équipements miniers et le remplacement des systèmes de transports par camion par un système de convoyeurs sont les deux types d'électrification principale présentement implémentés dans les projets miniers. L'électrification présente des avantages au niveau de la productivité, de la réduction des coûts liés au carburant, à la ventilation et aux émissions de GES, en plus d'améliorer la qualité de l'air pour les travailleurs.

Les véhicules à batterie présentent de nombreux avantages pour les opérations minières. En termes de productivité, une simulation de l'analyse de performance d'équipement diesel et d'équipement électrique révèle une disponibilité accrue de 7 % pour les véhicules électriques (Nieto et coll., 2020). Les auteurs notent que cette disponibilité varie en fonction des types de batteries utilisés. En termes de réduction des coûts, un article de l'Engineering & Mining Journal rapporte que d'ici 2030, on prévoit que les camions de transports électriques permettront de diminuer les coûts de propriété (*Cost of ownership*), de diminuer les coûts de maintenance de 20 % et d'économiser 40 % en coûts de carburants. Dans une étude comparant les besoins en ventilation et en climatisation des équipements électriques et diesel, Tahmasebi (2018) conclue que pour une mine

fictive avec durée de vie de quinze ans, une flotte de véhicules diesel coûte 441 M\$ en OPEX, carburant et coûts liés aux émissions alors que les coûts d'une flotte pleinement électrifiée sont estimés à 68 M\$, soit 85 % de moins²⁸(Tahmasebi, 2018). Une preuve de concept d'un LHD électrique de Caterpillar révèle des coûts en énergie dix fois inférieurs au modèle diesel (Gleeson, 2018). WesTrac, un distributeur de Caterpillar, rapporte que l'utilisation du Cat Loader hybride offre 31 % d'économie de carburants, réduit les coûts de maintenance et améliore la productivité (Engineering & Mining Journal (00958948), 2022).

L'électrification d'une mine peut également présenter des avantages en ce qui concerne l'acceptabilité sociale, l'accès au financement et au coût du capital. La mine de Newmont Goldcorp, situé à Borden en Ontario, a été appelée la mine du futur en raison de sa flotte de 35 véhicules électriques, comprenant des boulonneuses de roche, des foreuses et des véhicules utilitaires. En reconnaissance de la contribution de Borden à l'avenir de l'exploitation minière sûre et durable, les gouvernements canadien et ontarien ont accordé chacun 5 millions de dollars canadiens pour l'électrification de la mine (Mining Engineering, 2020). Enfin, l'électrification des équipements miniers permet de réduire considérablement ou d'éliminer les émissions de GES, à condition que les batteries soient rechargées à partir de sources d'électricité renouvelable. Lors d'une entrevue accordée pour l'Engineering and Mining Journal, Éric Desaulniers, PDG de Nouveau-Monde Graphite, a déclaré que Nouveau Monde prévoit qu'une flotte électrique alimentée par batteries réduira les émissions de gaz à effet de serre du parc de transport de Matawinie de 48 % une fois la transition effectuée. Cela équivaut à une économie d'environ 12 000 tonnes par an d'émissions de GES (Leonida, 2021).

14.1.5.2 Quelques exemples d'évaluation des coûts de l'électrification

Bien que peu de données soient disponibles quant aux coûts des équipements miniers électriques, une étude de Jacobs (2015) mentionne que les LHD électriques souterrains ont un coût en capital d'environ 20 % plus élevé qu'une unité diesel similaire. Paraszczak et coll. (2014) indiquent qu'un LHD électrique avec une capacité de chargement de 1,5 m³ coûte environ 30 % de plus qu'une machine diesel identique. Cependant, pour les chargeurs plus grands, cette différence est de 20 % à 25 %.

²⁸ Les coûts en OPEX, CAPEX, carburant, émissions et coûts totaux sont détaillés en Annexe. Voir le tableau 3.

L’Australian Institute of Mining & Metallurgy (AUSIMM) suggère qu’un chargeur diesel LHD d’une capacité de 13 à 15 tonnes coûtera environ un million de dollars en prix réels de 2010. Le prix d’un LHD électrique serait donc de 1,2-1,3 M\$ comparé à 1 M\$ pour un LHD diesel (Jacobs et coll., 2015).

14.1.6 Analyse d’autres technologies dans l’industrie minière

14.1.6.1 Quelques exemples d’évaluation des coûts et des bénéfices du tri avancé du minerai

Les technologies de tri du minerai désignent les différentes méthodes et techniques utilisées pour séparer les minéraux de valeur du minerai brut, en éliminant les matériaux indésirables ou stériles. Ces technologies visent à améliorer l’efficacité de l’exploitation minière, à réduire les coûts de traitement et à augmenter la qualité des minéraux extraits. Selon Lessard et coll. (2016), un obstacle majeur à une mise en œuvre des technologies de triage généralisée dans l’exploitation minière est un manque de connaissances : les fabricants d’équipements de tri ont réussi à pénétrer modestement l’industrie minière, tandis que ces technologies de pointe sont plutôt méconnues des mineurs et des opérateurs d’usines. Plus important encore, il existe un manque de compréhension généralisé de la manière dont les trieurs de minerai peuvent être mis en œuvre et de leur impact économique significatif.

Lessard et coll. (2014) évaluent la technologie de triage *Dual-Energy X-ray Transmission* (DE-XRT) et rapportent des économies potentielles de 60 % en coûts d’énergie de traitement du minerai grâce à la technologie de triage. Les auteurs mentionnent des CAPEX de 1M USD\$ pour un tel système de triage. Le coût d’exploitation le plus élevé pour une trieuse de minerai typique est l’air comprimé utilisé pour séparer les pierres après qu’elles ont traversé le capteur. Le coût associé à l’air comprimé variera en fonction de sa disponibilité dans l’usine et de la capacité finale de la trieuse de minerai. Les autres coûts accessoires comprennent l’électricité nécessaire pour alimenter la source DE-XRT et l’énergie requise pour faire fonctionner le convoyeur à bande (généralement un moteur de 12 chevaux). En général, les trieuses de minerai ont une capacité comprise entre 50 et 300 tonnes par heure (TPH), avec des équipements à grande capacité en cours de développement.

Lessard et coll. (2016) étudient l’impact du tri de minerai sur un circuit de traitement de cuivre. L’analyse présentée démontre que même à petite échelle, le tri du minerai est économiquement viable dans de nombreuses applications de roche dure. Ces avantages augmentent avec la capacité, de sorte que des niveaux de tri plus élevés génèrent des avantages économiques accrus. Dans le scénario analysé, le délai de recouvrement du

capital est de vingt mois, le TRI est estimé entre 61 % et 106 %, alors que les profits excèdent 4,5 M USD par année.

Robben & Wotruba (2019) recensent l'évolution des technologies de traitement du minerai. Au terme d'une vaste revue de littérature, les auteurs postulent qu'en général il existe un consensus parmi plusieurs auteurs dans la littérature selon lequel le tri du minerai basé sur les capteurs est largement applicable, contribue à accroître la productivité et répond aux principaux défis liés à la baisse des teneurs en minerai, à la difficulté croissante d'accéder aux ressources de soutien au processus (telles que les terres, l'énergie et l'eau) et à la responsabilité environnementale accrue. Cependant, à l'exception des minéraux industriels et du traitement des diamants, le tri du minerai basé sur les capteurs peut encore être considéré comme étant au stade d'entrée sur le marché pour l'industrie minière.

La Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) a développé le tout premier système de capteurs pour le tri en grande quantité du minerai au monde. Il détermine rapidement la teneur en minerai pour trier de manière rentable les minéraux de valeur des déchets. Cette technologie peut considérablement augmenter la productivité des entreprises minières et est disponible sur le marché international depuis 2018 grâce à NextOre. Les avantages pour les producteurs varient en fonction du gisement de minerai exploité, mais ils ont le potentiel de plus que doubler la qualité moyenne du minerai. Cela pourrait représenter une réduction des coûts de traitement pouvant aller jusqu'à 20 % dans certaines mines de cuivre (CSIRO, s. d.).

14.1.6.2 Quelques exemples d'évaluation des coûts et des bénéfices du blast monitoring

La surveillance des explosions (*blast monitoring*) fait référence au processus de mesure et d'évaluation d'effets des explosions ou des déflagrations sur l'environnement. Cela implique la surveillance de différents paramètres afin de s'assurer que l'explosion ne provoque pas de vibrations excessives, de mouvements du sol ou de dommages aux structures avoisinantes. Bien que la surveillance des explosions soit déjà largement utilisée dans l'industrie minière, les avancées technologiques ont permis de développer des équipements de surveillance plus sophistiqués et des techniques d'analyse des données plus précises, permettant une évaluation plus précise et en temps réel des effets des explosions.

Blast Movement Technologies (BMT) est une des entreprises qui mène l'innovation à ce chapitre. Teck's Red Dog zinc rapporte des économies de 6,5 M USD\$ grâce aux données recueillies par les capteurs lors des déflagrations (BMT, 2019).

Selon une étude coût-bénéfice du nombre optimal de localisations des capteurs *Blast Movement* de (Loeb & Thornton, 2014), une estimation conservatrice du prix total d'une unité de surveillance BMT se chiffre à 500 USD\$²⁹. L'analyse révèle que pour les deux études de cas avec des données financières complètes, d'un point de vue purement coûts-avantages (coût par emplacement de surveillance supplémentaire par rapport au gain de revenu incrémentiel), des centaines d'emplacements de surveillance amélioreraient la précision du contrôle du minerai de manière rentable. Pour 100 et 250 capteurs, les auteurs estiment des CAPEX d'environ 50 000 USD et 125 000 USD\$ respectivement. Les auteurs mentionnent qu'une telle quantité de capteurs n'est clairement pas pratique, mais elle met en évidence la valeur d'une prise en compte précise du mouvement de déflagration et le fait qu'une limite pratique sur le nombre de dispositifs de surveillance des déflagrations est atteinte bien avant une limite financière. Bien que l'impact sur les revenus soit dépendant du type de minerai, les études portant sur un gisement d'or et de platine ont révélé des gains de 745 000 USD pour une mine d'or en Afrique (565 onces d'or à 1300 \$/oz) en utilisant sept capteurs et de 700 000 USD pour une mine de platine en Afrique (485 onces à 1450 USD\$ /oz).

14.1.6.3 Quelques exemples d'évaluation des coûts et des bénéfices des technologies de communication

Le développement rapide des technologies industrielles et de communication ces dernières années bénéficie de plus en plus aux activités minières à travers le monde et a affecté pratiquement tous les aspects du processus minier. Les entreprises déploient rapidement ces nouveaux outils et applications pour en tirer des avantages opérationnels. Cependant, elles sont confrontées à un défi majeur qui consiste à disposer de l'infrastructure appropriée pour prendre en charge la technologie de communication de données dans l'environnement minier, en particulier dans les mines souterraines. La LTE est une technologie relativement nouvelle dans l'environnement des mines souterraines qui offre de nouvelles applications et des avantages potentiels en termes de performances et de coûts pour l'industrie.

La LTE peut être utilisée dans les mines souterraines pour la plupart des applications pertinentes, y compris les communications en mode diffusion, les communications de pair à pair, *push-to-talk*, le suivi des actifs et du personnel, ainsi que le contrôle à distance/autonome de l'équipement. La mine LaRonde (LZ5) est considérée comme la

²⁹ Ce prix inclut : le coût total de propriété du système, le forage, l'installation, les temps de détection et les matériaux.

preuve de concept pour l'adoption de la LTE. Dans le rapport du Global Mining Guidelines Group³⁰ (2019) qui rapporte une entrevue avec Agnico Eagle, il est mentionné que dans la mine de LaRonde (LZ5), au total, le coût par mètre de l'installation LTE (incluant les *remote radio units (RRU)*, les câbles et les antennes) est plus faible que celle du Wi-Fi (environ 30 CAD\$/m en moyenne vs plus de 50 CAD\$/m pour le Wi-Fi). Bien que le noyau du serveur et les licences pour la LTE soient plus élevés que pour le Wi-Fi, le coût global du cycle de vie du réseau LTE (pour une capacité de données et de voix à haute performance) avec une configuration, une installation et une maintenance beaucoup plus faciles est prévu pour être beaucoup plus bas que pour le Wi-Fi. De plus, la LTE permet une meilleure cybersécurité.

14.1.7 Bilan de l'annexe sur les évaluations des coûts et des bénéfices de certaines innovations technologiques

Dans cette sous-section, il a été expliqué en quoi la transformation numérique est au cœur des avancées technologiques de l'industrie minière, offrant un potentiel économique significatif grâce à l'intégration de technologies telles que l'automatisation, l'Internet des objets et l'intelligence artificielle pour améliorer la productivité et réduire les coûts.

Il est toutefois important de préciser que les exemples présentés dans ce chapitre ne sont pas nécessairement propres au Québec compte tenu d'un manque de littérature à cet effet, mais des extrapolations peuvent être faites en contrôlant pour certains autres facteurs qui peuvent différencier le Québec de certaines régions étudiées. Certains autres éléments importants sont à prendre en compte également tels que la taille de la mine ou encore le type de minerai. Par exemple, la question de la taille de l'entreprise en relation avec l'adoption de l'innovation n'est pas tranchée. Les recherches de Pereira Cabral et coll. (2020) suggèrent que les petites organisations se montrent plus innovantes grâce à leur flexibilité structurelle, tandis que (Mohnen & Röller, 2003) ont observé que les grandes entreprises ont tendance à être plus innovantes en raison de leurs ressources financières et de leur capital humain plus importants.

Il est important également de préciser que les obstacles technologiques, comme l'inadaptation des technologies aux processus existants, le manque d'accès à des données normalisées et les problèmes de connectivité réseau, ont été identifiés comme des

³⁰ Le rapport du Global Mining Guidelines Group (2019) est la ressource la plus complète et détaillée faisant une revue des technologies de communication dans l'industrie minière

obstacles technologiques à l'adoption de l'innovation dans le secteur minier (Gao et coll., 2019). Dans ce contexte, il est donc crucial de reconnaître l'importance des projets pilotes (Samis & Steen, 2020) pour explorer et évaluer ces opportunités et surmonter les obstacles à l'adoption de l'innovation. Ce dernier point relève bien entendu du contexte organisationnel de l'entreprise et sera davantage détaillé dans cette partie du rapport.

En guise de bilan pour cette section, nous présentons un tableau de synthèse qui met en lumière les trois principales technologies examinées, tout en classant leurs bénéfices en fonction des grandes catégories d'avantages compétitifs, comme indiqué dans la grille générique des avantages compétitifs développée par le Groupe MISA³¹. Cette approche vise à fournir une vision globale des avantages liés à l'adoption de ces technologies dans l'industrie. Le tableau de synthèse permettra de mieux comprendre comment ces technologies peuvent contribuer à renforcer la position concurrentielle des entreprises dans le secteur tout en prenant en compte les gains potentiels.

Les études montrent globalement que l'automatisation est hautement rentable grâce aux gains en productivité et à la réduction du besoin de main-d'œuvre. L'électrification est également rentable, bien que dans une moindre mesure, grâce aux économies de carburants et à une réduction des besoins de ventilation. Les technologies numériques présentent d'importants bénéfices, mais une difficulté au niveau de l'évaluation des coûts d'acquisition et d'intégration demeure. Ces évaluations économiques des coûts et des bénéfices vont servir d'intrants dans la simulation financière du chapitre 5.

³¹ Source : Communication personnelle avec Alain Beauséjour, Directeur Général du Groupe MISA le 29 juin 2023.

Avantages compétitifs / technologies	Transformation numérique	Automatisation	Électrification
Économie de coûts (moins cher)	<p>Ressource World (2022) : L'utilisation de l'IA dans la prévision des besoins de maintenance permettrait une réduction de 20-25 % des coûts liés à la maintenance, Morton (2022) : le logiciel de forage réduit les coûts dus à la dilution non prévue de 62 %</p>	<p>Moreau et coll. (2020) : Économies de carburant de 15-30 %, Sandvik Mining and Rock Solutions (2018) : Diminution des coûts de maintenance de 30 %, Hyder et coll. (2019) : Diminution des OPEX de 15 %</p>	<p>Gleeson (2018b) : Réduction des coûts d'énergie de 90 %, Engineering and Mining Journal (2022) : Diminution des coûts de maintenance de 20 % et des coûts de carburant totaux de 40 %, Tahmasebi (2018) : Baisse de 95 % des besoins de ventilation, baisse de 77 % des coûts de carburant</p>
Efficience (faire autant avec moins de ressources)	<p>Afrapoli (2023)</p>	<p>Moreau et coll. (2020), Moreau et coll. (2020b)</p>	
Productivité (faire plus avec les mêmes ressources)	<p>Afrapoli (2023) : Jumeau digital a permis une augmentation de 33 % de la productivité des camions, une réduction du temps de cycle de 25 %, Morton (2022) : le logiciel de forage augmente la productivité du forage de 31 % et augmentation de la production d'or de 7 %</p>	<p>Kenny (2022) : 8-10 % plus de tonnage par jour, Moreau et coll. (2020b) : Productivité accrue de 35 %, Rio Tinto (2018a) : Productivité accrue de 11 % pour les camions et de 26 % pour le système de forage, Parreira (2013) : Productivité accrue de 21 % des LHDs et camions</p>	<p>Nieto et coll. (2020) : Disponibilité accrue des LHDs et des camions de 7 %</p>

Avantages compétitifs / technologies	Transformation numérique	Automatisation	Électrification
Risque santé et sécurité	Afrapoli (2023) : Jumeau digital a permis une réduction des accidents dus aux excès de vitesse de 43 %	Moreau et coll. (2020) : Réduction des accidents, retrait de la main-d'œuvre des zones à risque	Tahmasebi (2018) : Réduction de 86 % des émissions
Risque environnement		Moreau et coll. (2020), Moreau et coll. (2020b) : Réduction de 18 % des GES	Gleeson (2018b), Tahmasebi (2018)
Risque réputationnel	Afrapoli (2023) : Jumeau digital a permis une réduction de 2,5 % de la consommation d'énergie de la mine (Efficacité énergétique), Ressource World (2022)	Moreau et coll. (2020), Moreau et coll. (2020b)	Gleeson (2018b), Tahmasebi (2018)

Source : auteurs

14.2 Annexe 2 : Liste des rapports NI 43-101 et tableau synthèse

Projet	Détenteur	Année de publication
Abcourt-Barvue	Mines Abcourt Inc.	2019
Bloom Lake	Champion Iron	2019
Cote Gold	IAMGOLD Corporation / Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.	2022
Croinor	Monarch Mining Corporation	2018
Détour-Fenelon	Wallbridge Mining Company Limited	2021
Eleonore	Goldcorp	2014
Gladiator, Barry and Monroy Deposits, Bachelor Mine	Bonterra Inc.	2021
Granada Gold	Granada Gold Mine Inc.	2022
Hemlo	Barrick Gold Corporation	2017
Horne 5	Falco Resources Ltd.	2021
Kiena	Wesdome Gold Mines Ltd.	2021
Labrador West Iron	High Tide Resources Corp.	2020
Lac à Paul	Arianne Phosphate Inc	2013
Lac Guéret	Mason Graphite Inc.	2018
Lac Otelnuk	Lac Otelnuk Mining Ltd.	2015
Lamaque	Eldorado Gold Corporation	2018
Marban	03 Mining Inc.	2022
Matawinie	Nouveau Monde Graphite	2022
Nelligan	IAMGOLD Corporation	2019
North American Lithium	Sayona Mining Ltd.	2022
Odyssey (Canadian Malartic Property)	Yamana Gold Inc. / Agnico Eagle Mines Ltd.	2021
Renard	Stornoway Diamond Corporation	2013

Swanson	Monarch Mining Corporation	2021
Troilus	Troilus Gold Corp.	2020
Val-d'Or East	Probe Metals Inc.	2021
Wasamac	Yamana Gold Inc.	2021
Whabouchi	Nemaska Lithium Inc.	2019
Windfall	Osisko Mining Inc.	2021

Le tableau suivant regroupe les éléments importants identifiés dans quelques rapports NI 43-101 et études de faisabilité des projets miniers depuis 2018. La colonne *Innovation / technologie prévue* regroupe les technologies pour lesquelles l'entreprise s'engage explicitement à adopter la technologie si ce n'est déjà fait. La colonne *Innovation / technologie potentielle* regroupe les technologies pour lesquelles l'entreprise conçoit la possibilité d'adoption, mais sans engagement comme tel. C'est souvent conditionnel au développement de la technologie, à une étude en cours, à diminution des coûts, etc.

Les cases vides le sont à dessein. Cela signifie qu'aucun élément n'a été identifié dans les rapports NI 43-101.

Projet (détenteur)	Matawinie (NM Graphite)
Date de publication du	2022
Commodité principale	Graphite
Innovation / technologie prévue	<p>Réduction GES «through the strategic integration of some of the industry’s latest technological innovations and best practices to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and minimize environmental impacts.» p.60</p> <p>Flotte zéro-émission remplacement de sa flotte diesel (construction, minage et équipements) par une flotte zéro-émission p.425</p> <p>«Implement high standard and innovative technology for tailings and mine waste management as well as site reclamation.» p.533</p>
Innovation / technologie potentielle	<p>Foreuses de surface entièrement électrifiées «NMG is evaluating a fully electrified surface drill rigs for mining operations.» p.425 Premier prototype en 2023.</p>
Automatisation	
Nom des technologies mentionnées	Fleet electrification, electrified surface drill rigs
Facteurs ESG	<p>Standards ESG «With ambitious ESG standards, NMG is designing a mine of the future, targeted to be all-electric, complemented by clean advanced beneficiation facilities maximizing energy efficiency» p.41</p>
R&D, Partenariats, Autres infos	<p>Partenariat avec Caterpillar pour le développement d'équipements zéro émission pour propulser entièrement le site par de l'énergie renouvelable à empreinte carbone neutre «In June, 2021, NMG entered into of a collaboration agreement with Caterpillar Inc. under which Caterpillar Inc. will develop, test, and produce Cat® “zero-emission machines” for the Phase 2 Matawinie Mine, with a view to becoming the exclusive supplier of an all-electric mining fleet for deployment at the Phase 2 Matawinie Mine 5 years after the mine start-up.» p.425</p> <p>Partenariat avec le Centre National de Recherche du Canada «The National Research Council has funded a project to analyze the performance of a battery electric truck prototype that will be tested and implemented at the NMG mine site. The purpose of the study was to address the gaps in public evidence and preconceptions relating to the electrification of mining vehicles, particularly those for open-pit operations.» p.425</p>
Revenu Total (M\$) CAD	14 897
CAPEX totaux (Initial + Sustaining) (M\$)	1 466

Projet (détenteur)	Wasamac (Yamana)
Date de publication du	2021
Commodité principale	Or
Innovation / technologie prévue	<p>Coûts de préproduction en technologie et innovation: 3.7M\$ Coûts totaux du projet: 533M\$ (p.52)</p> <p>Mention de technologie moderne «The Wasamac Project’s wide stopes (typically 10 to 15 m), relatively shallow depth, underground conveyor system, and adoption of modern technology are expected to establish it as a lowcost underground mining operation» p.173,</p> <p>Automatisation dans l'équipement et le transport du minerai «The main ore handling system is an automated diesel fleet (trucks and LHD). The equipment pairing retained is the TH663i (63 tonnes) with the LH621i (21 tonnes), supplied by Sandvik. The chosen models are ready for optimal automation and provide the best cost per tonne compared to equivalent equipment.» p.190,</p> <p>Automatisation des foreuses «Wasamac plans to take full advantage of the DL432i automation capabilities. Intelligent drilling control system and automated drilling through shift changes ensure optimal drilling, while maximizing utilization.» p.200, «To maximize the efficiency of main equipment, automation is planned between shifts. The automation will begin at the end of the pre-production period, around July 2027.» p.207</p> <p>Gestion des résidus «Dry stack tailings management technology presents the advantage of reducing the required mining footprint and facilitating progressive reclamation.» p.274</p>
Innovation / technologie potentielle	<p>Volonté de mettre à profit les avancées technologiques « Yamana will take advantage of additional technological advances, including ventilation-on-demand and high-efficiency fans, to reduce power requirements, as they become available.» p.173,</p> <p>Automatisation des véhicules électriques, défis et fournisseurs potentiels «One of the main aspects of the production plan is automation; however, battery electric vehicles (BEV) are not currently up to the task, as the equipment batteries discharge too rapidly. According to Sandvik, fully automated BEVs at a size compatible with the Wasamac project should be available by 2025. Artisan’s product line will also soon be able to provide the Z65 truck (65 tonne) and LHD A18 (18 tonne), which should include the automation options.» p.375</p>
Automatisation	<p>Automatisation et productivité « The production is based on the automation potential of the equipment between shifts to ensure maximal ore output throughout life of mine; guaranteeing a continuous mineral reserve in the ore bin located under the grizzly.» p.188,</p> <p>Gestion de la flotte de camions, opérateurs de pelles et opérateurs de foreuse «The mine automation system was proposed by Sandvik and includes the fleet management for trucks, scoop operators, and drill operators. Operator workstations sited within the control room for the underground will manage the automation and remote operation of the mine equipment from surface in the office complex.» p.211</p> <p>Automatisation dans l'équipement et le transport du minerai « The main ore handling system is an automated diesel fleet (trucks and LHD). The equipment pairing retained is the TH663i (63 tonnes) with the LH621i (21 tonnes), supplied by Sandvik. The chosen models are ready for optimal automation and provide the best cost per tonne compared to equivalent equipment. P.190»</p>
Nom des technologies mentionnées	TH663i, LH621i (supplied by Sandvik), DL432i (automated drilling), Dry stack tailing management, ventilation-on-demand, high-efficiency fans, Z65 truck and LHD68 (Artisan), fleet management for trucks, scoop operators and drill operators
Facteurs ESG	<p>Réduction des GES « Another objective of the project is the reduction of CO2 emissions by utilizing best technologies and appropriate mining strategies and practices.» p.173, «target a reduced carbon footprint by application of automation and technology, also geared to increase operational safety» p.353</p>
R&D, Partenariats, Autres infos	«adoption of modern technology are expected to establish the project as a low-cost underground mining operation.» p.362 Ils sont parmi les seuls à mentionner l'adoption de technologies modernes dans une optique de réduction de coûts.
Revenu Total (M\$) CAD	3 359
CAPEX totaux (Initial + Sustaining) (M\$)	939

Projet (détenteur)	Odyssey (Canadian Malartic)
Date de publication du	2021
Commodité principale	Or
Innovation / technologie prévue	<p>Intelligence artificielle et enregistrement automatique de la carotte de forage «It is also suggested to further investigate new technologies such as artificial intelligence and automatic core logging on existing data to improve understanding of the controls on mineralization.» p.33</p> <p>Technologie anticollision et ventilation sur demande «The Odyssey Project is expected to be a modern underground mine and will utilize real-time monitoring and communication with workers, anti-collision technology, and ventilation-on-demand. An LTE communication network covering 100% of operations on surface and underground will support this digital architecture.»</p>
Innovation / technologie potentielle	<p>Décarbonation et développement technologique «The broad goal would be to use as little diesel equipment as possible. Canadian Malartic GP continually monitors technological developments in this area and will continue to consider the possibility of using and acquiring electrical equipment if equivalent in terms of safety, performance and cost while reducing greenhouse gas emissions, lowering underground ventilation needs, and improving the quality of breathable air for workers.» p.35</p>
Automatisation	
Nom des technologies mentionnées	Automatic Core logging, artificial intelligence, anti-collision technology, ventilation-on-demand,
Facteurs ESG	Oui, se référer à la colonne: technologies potentielles
R&D, Partenariats, Autres infos	Canadian Malartic soutient la recherche et développement des instituts suivants : L'institut de recherche en mines et environnement (IRME) UQAT-Polytechnique, La chaire de industrielle CRSNG-UQAT sur la biodiversité en contexte minier, Consortium de recherche en traitement de mienrai (COREM)
Revenu Total (M\$) CAD	14 034
CAPEX totaux (Initial + Sustaining) (M\$)	2 534

Projet (détenteur)	Horne 5 (Falco)
Date de publication du	2021
Commodité principale	Or
Innovation / technologie prévue	
Innovation / technologie potentielle	<p>Technologie de broyage secondaire «Continue to monitor and work with regrind mill technology suppliers to include potential improvements currently being tested.» p.914</p> <p>Production de traitement des eaux «A new advanced WTP will be required subsequently (Year 3 and beyond). The advanced WTP will be required to meet strict effluent targets, including limits for sulphate, ammonia, and nitrate among other constituents. The advanced WTP involves a complex, multi-step treatment process that introduces inherent operational and cost inflation risks.» p.921</p> <p>Dynamitage intelligent, automatisation des équipements mobiles et des stations de pompage «Other options could be implemented in the future, such as: Blasting with «smart blast» technology, mobile equipment telemetry, monitoring, pumping station automation,</p>
Automatisation	<p>Ventilation sur demande, téléopérations, automation du rockbreaker et du treuil «To automate the mine operations, there are several solutions that are going to be implemented such as: ventilation-on-demand, tele-perations, rock breaker automation, hoists automation» p.488</p> <p>Automation et réduction des coûts «The mine has been designed to have low operating costs through the extensive use of automation, implementation of large modern remote-controlled trackless equipment,</p>
Nom des technologies mentionnées	Ventilation-on-demand, tele-operations, rock breaker automation, hoists automation, smart blast technology, mobile equipment telemetry, monitoring, pumping station automation, regrind mill technology
Facteurs ESG	
R&D, Partenariats, Autres infos	
Revenu Total (M\$) CAD	8 721
CAPEX totaux (Initial + Sustaining) (M\$)	1 843

Projet (détenteur)	Windfall (Osisko Mining)
Date de publication du	2021
Commodité principale	Or
Innovation / technologie prévue	Automatisation du déblayage de la chambre d'extraction «Stope mucking will utilize tele-remote operation technology to support efficient production and reduce hazards to operators.» p.318
Innovation / technologie potentielle	Productivité et réduction des coûts «Increasing the use of automation and technology could increase productivity and reduce operating costs in the mine and process plant» p.78 Études futures: électrification et automatisation des équipements « Perform additional trade-off studies concerning: ... and automation options ; diesel vs. electric mobile equipment; consideration of mobile equipment automation to determine cost impacts» p.509
Automatisation	
Nom des technologies mentionnées	Tele-remote operation technology, electric mobile equipment
Facteurs ESG	
R&D, Partenariats, Autres infos	
Revenu Total (M\$) CAD	8 182
CAPEX totaux (Initial + Sustaining) (M\$)	1 305

Projet (détenteur)	Val d'or East (Probe)	Whabouchi (Nemaska)
Date de publication du	2021	2019
Commodité principale	Or	Lithium
Innovation / technologie prévue	Aucune innovation technologique prévue «The comminution and recovery processes are widely used with no significant elements of technological innovation.» p.404	Technologie de cartographie laser «LiDAR laser mapping technology provided for the Project by Nemaska» p.307 Technologie de concentration d'acide «Acid concentration technologies are well known and extensively used in other industries but will be operated commercially for the first time with acidic solutions containing lithium salts.» p.506
Innovation / technologie potentielle	Tri du minerai «The promising results obtained from the mineral sorting testwork have shown that the technology warrants further investigation for inclusion in the process flowsheet as a pre-concentration step.» p.181	
Automatisation		Réseau des procédés automatisés «Automation Process Network: The network links all the main automation equipment, such as Supervisory Control and Data Acquisition (“SCADA”) system, Historian, Human Machine Interface (“HMI”) and Process Control System processor.» p.315
Nom des technologies mentionnées		LiDAR laser mapping technology, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), Historian, Human Machine Interface, Process Control System processor, Acid concentration technologies
Facteurs ESG	Mineral sorting technology	
R&D, Partenariats, Autres infos		Mention d'une étude en bas de page Nemaska Lithium, mars 10 2017 : Essai d'une technologie de triage de minerais par transmission de rayons-X et par différenciation des couleurs de surface des particules, Rapport de visite du centre d'essais de TOMRA test center in Wedel, Germany – 35 pages
Revenu Total (M\$) CAD	5 165	20 249
CAPEX totaux (Initial + Sustaining) (M\$)	954	1 348

14.3 Annexe 3 : Hypothèses détaillées de la simulation financière

14.3.1 Automatisation des LHDs et des camions

14.3.1.1 Scénario de base (automatisation):

Hypothèses

- **Revenus** : les gains de productivité dans le processus d'extraction (20 %) se traduisent par un impact sur les revenus annuels de **14 %**.³² L'hypothèse est qu'un tiers des gains en productivités au niveau de l'extraction minière sont perdus dans le reste de la chaîne de production.
- **Carburant** : diminution de la consommation de carburant (**-20 %**) puisque les véhicules autonomes conduisent à une vitesse plus constante et qu'ils passent moins de temps immobilisés
- **Maintenance** : diminution des coûts liés à la maintenance (**-20 %**) due à la diminution des accidents
- **Main-d'œuvre** : diminution des salaires affectés aux opérations de chargement et de transport de minerai (**- 50 %**)
- **Ventilation** : diminution des coûts liés à la ventilation (**-50 %**)

14.3.1.2 Scénario pessimiste (automatisation):

Hypothèses

- Revenus** : aucun gain en productivité puisque les camions connaissent des délais, leur vitesse moyenne est inférieure à celle des camions diesel vu des conditions difficiles, leur disponibilité n'est pas accrue, des interruptions au niveau des systèmes de télécommunications et des besoins en maintenance non planifiés interrompent la production, etc.
- **Carburant** : plus faible économie de carburant (-10 %)
 - **Maintenance** : plus faible économie des coûts liés à la maintenance³³ (-10 %)
 - **Main-d'œuvre** : plus faible baisse des salaires affectés aux opérations de chargement et de transport de minerai (-30 %), hausse des salaires dus à un besoin accru de personnel qualifié et formé pour diriger, superviser et supporter les camions autonomes dans d'autres tâches connexes

³² On suppose dans la simulation que la productivité accrue des équipements dédiés à l'extraction minière ne se traduit pas par une hausse équivalente sur l'ensemble de la chaîne de production.

³³ Main-d'œuvre, équipements et pièces, etc.

- **Ventilation** : Plus faible réduction des besoins en ventilation (-20 %) due à diminution moins importante qu'anticipée de main-d'œuvre sous terre

14.3.2 Électrification des LHDs et des camions

14.3.2.1 Scénario de base (électrification):

Hypothèses

Revenus : légère hausse de la productivité due à une hausse de la disponibilité des camions et des chargeuses (7 %). Impact sur les revenus de 2 %.

Carburant : diminution des coûts du carburant (-75 %)

Maintenance : diminution des coûts liés à la maintenance (-20 %)

Ventilation : diminution des besoins de ventilation (-80 %)

14.3.2.2 Scénario pessimiste (électrification):

Hypothèses

- **Revenus** : aucun gain en productivité des camions
- **Carburant** : économie de carburant plus faible que prévu (difficultés ou délais à se raccorder au réseau d'HQ, délai d'implantation des camions électriques, utilisation accrue de génératrices au gaz, etc.
- **Maintenance** : plus faible diminution des coûts de maintenance (-10 %) des équipements électriques, bris majeurs, main-d'œuvre qualifiée, pièces et équipements plus difficiles à se procurer, etc.
- **Ventilation** : plus faible diminution des coûts de ventilation (-50 %)

14.3.3 Données financières du projet « Val-d'Or East

Table 22-2: Economic Analysis Summary

General	LOM Total / Avg.
Gold Price (US\$/oz)	\$1,500
Exchange Rate (CAD:USD)	0.75
Mine Life (years)	12.5
Total Waste Tonnes Mined (kt)	366,924
Total Mill Feed Tonnes (kt)	45,199
Strip Ratio	6.42x
Production	
Mill Head Grade (g/t)	1.88
Mill Recovery Rate (%)	94.7%
Total Mill Ounces Recovered (koz)	2,584
Total Average Annual Production (koz)	207
Operating Costs	
Mining Cost (C\$/t Mined)	\$4.49
Processing Cost (C\$/t Milled)	\$13.26
G&A Cost (C\$/t Milled)	\$2.72
Refining & Transport Cost (C\$/oz)	\$2.50
Total Operating Costs (C\$/t Milled)	\$58.81
Cash Costs (US\$/oz Au)	\$786
AISC (US\$/oz Au)	\$965
Capital Costs	
Initial Capital (C\$M)	\$353
Sustaining Capital (C\$M)	\$602
Closure Costs (C\$M)	\$30
Salvage Costs (C\$M)	(\$13)
Financials	
Pre-Tax NPV (5%) (C\$M)	\$991
Pre-Tax IRR (%)	47.2%
Pre-Tax Payback (years)	1.8
Post-Tax NPV (5%) (C\$M)	\$598
Post-Tax IRR (%)	32.8%
Post-Tax Payback (years)	2.7

Notes: * Cash costs consist of mining costs, processing costs, mine-level G&A, refining charges, and royalties. ** AISC includes cash costs plus sustaining capital, closure costs, and salvage value. Source: Ausenco, 2021.

Source : (Raponi et al., 2021), p. 356

Table 22-3: Project Cash Flow

Cash Flows Discounted to Start of Construction Period Macro Assumptions	Units	Sum/Avg	-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gold Price - Flat	US\$/oz	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500
Foreign Exchange	CAD:USD	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75	\$0.75
Free Cash Flow Valuation																			
Revenue	C\$M	\$5,165	--	\$561	\$395	\$421	\$384	\$455	\$474	\$566	\$433	\$366	\$322	\$338	\$296	\$154	--	--	--
Operating Cost	C\$M	(\$2,658)	--	(\$189)	(\$208)	(\$209)	(\$242)	(\$259)	(\$278)	(\$290)	(\$231)	(\$166)	(\$160)	(\$177)	(\$157)	(\$93)	--	--	--
Refining Charges & Transportation	C\$M	(\$6)	--	(\$1)	(\$0)	(\$1)	(\$0)	(\$1)	(\$1)	(\$1)	(\$1)	(\$0)	(\$0)	(\$0)	(\$0)	(\$0)	--	--	--
Royalties	C\$M	(\$41)	--	(\$4)	(\$3)	(\$3)	(\$3)	(\$4)	(\$4)	(\$5)	(\$3)	(\$3)	(\$3)	(\$3)	(\$2)	(\$1)	--	--	--
EBITDA	C\$M	\$2,459	--	\$367	\$184	\$208	\$138	\$192	\$191	\$271	\$199	\$197	\$159	\$158	\$136	\$59	--	--	--
Initial Capital Cost	C\$M	(\$353)	(\$353)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Sustaining Capital Cost	C\$M	(\$602)	--	(\$128)	(\$36)	(\$93)	(\$51)	(\$54)	(\$32)	(\$34)	(\$40)	(\$43)	(\$42)	(\$32)	(\$11)	(\$6)	(\$0)	--	--
Closure Capital Cost	C\$M	(\$30)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	(\$30)	--	--	--
Salvage Value	C\$M	\$13	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	\$13	--	--	--
Federal Permitting Cost	C\$M	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Royalty Buybacks	C\$M	(\$2)	(\$2)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Pre-Tax Unlevered Free Cash Flow	C\$M	\$1,486	(\$354)	\$239	\$148	\$115	\$87	\$138	\$159	\$237	\$159	\$153	\$117	\$126	\$125	\$37	(\$0)	--	--
Pre-Tax Cumulative Unlevered Free Cash Flow	C\$M	\$1,486	(\$354)	(\$115)	\$33	\$148	\$236	\$374	\$533	\$769	\$928	\$1,082	\$1,199	\$1,325	\$1,450	\$1,487	\$1,486	\$1,486	\$1,486
Federal Income Tax	C\$M	(\$179.9)	--	(\$12)	(\$13)	(\$17)	(\$7)	(\$16)	(\$16)	(\$27)	(\$19)	(\$19)	(\$14)	(\$15)	(\$13)	(\$1)	\$4	\$3	\$2
Provincial Income Tax	C\$M	(\$144.8)	(\$10)	(\$10)	(\$13)	(\$6)	(\$12)	(\$13)	(\$21)	(\$14)	(\$14)	(\$11)	(\$11)	(\$10)	(\$1)	--	--	--	--
Mining Tax	C\$M	(\$222.6)	--	(\$26)	(\$13)	(\$16)	(\$9)	(\$15)	(\$19)	(\$33)	(\$22)	(\$22)	(\$16)	(\$16)	(\$14)	(\$2)	--	--	--
Post-Tax Unlevered Free Cash Flow	C\$M	\$939	(\$354)	\$192	\$113	\$69	\$66	\$96	\$111	\$155	\$104	\$98	\$76	\$84	\$87	\$33	\$4	\$3	\$2
Post-Tax Cumulative Unlevered Free Cash Flow	C\$M	\$939	(\$354)	(\$162)	(\$50)	\$20	\$85	\$182	\$293	\$448	\$552	\$650	\$726	\$810	\$897	\$931	\$935	\$938	\$939
Production Profile																			
Production Summary																			
Total Resource Mined	kt	64,287	878	7,143	7,561	7,407	7,055	7,965	6,379	7,790	4,958	3,216	1,080	1,260	937	658	--	--	--
Total Stockpile Reclaim	kt	25,748	--	283	262	214	454	968	798	2,192	1,973	3,304	4,614	4,434	4,758	1,496	--	--	--
Total Waste	kt	366,924	9,047	37,575	44,177	44,379	49,171	47,901	49,879	48,018	28,790	7,986	--	--	--	--	--	--	--
Total Material Mined	kt	431,211	9,925	44,717	51,738	51,786	56,226	55,867	56,258	55,809	33,748	11,203	1,080	1,260	937	658	--	--	--
Strip Ratio	w.o	6.4x	10.3x	5.3x	5.8x	6.0x	7.2x	6.3x	8.5x	6.8x	6.7x	3.2x	--	--	--	--	--	--	--
Project Life	years	12.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Mill Feed	kt	45,199	--	3,655	3,655	3,655	3,655	3,655	3,655	3,655	3,655	3,655	3,645	3,645	3,646	1,368	--	--	--
Mill Head Grade	g/t	1.88	--	2.51	1.78	1.90	1.73	2.04	2.12	2.53	1.94	1.65	1.46	1.53	1.34	1.85	--	--	--
Gold Recovery	%	94.7%	--	95.2%	94.6%	94.6%	94.6%	94.9%	95.1%	95.4%	94.9%	94.4%	94.2%	94.3%	93.9%	94.6%	--	--	--
Gold Recovered	koz	2,584	--	281	198	211	192	228	237	283	217	183	161	169	148	77	--	--	--
Gold % Payable	%	99.95%	--	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	99.95%	--	--	--
Payable Gold	koz	2,583	--	280	198	211	192	228	237	283	217	183	161	169	148	77	--	--	--
Revenue	C\$M	\$5,165	--	\$561	\$395	\$421	\$384	\$455	\$474	\$566	\$433	\$366	\$322	\$338	\$296	\$154	--	--	--
Operating Costs																			
Mine Operating Costs	C\$M	\$1,936	--	\$136	\$155	\$156	\$183	\$200	\$219	\$231	\$172	\$107	\$101	\$118	\$98	\$62	--	--	--
Mill Operating Costs	C\$M	\$600	--	\$44	\$44	\$44	\$50	\$50	\$50	\$50	\$50	\$50	\$50	\$50	\$50	\$22	--	--	--
G&A Costs	C\$M	\$123	--	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	\$9	--	--	--
Operating Costs per tonne Processed	C\$/t Processed	\$58.8	--	\$51.6	\$56.9	\$57.1	\$66.3	\$70.8	\$76.1	\$79.5	\$63.1	\$45.4	\$43.8	\$48.6	\$43.1	\$67.9	--	--	--
Refining, Transport Cost & Royalties																			

Source : (Raponi et al., 2021), p. 357

Cash Flows Discounted to Start of Construction Period Macro Assumptions	Units	Sum/Avg	-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Refining Charges & Transportation Cost	C\$M	\$6	--	\$1	\$0	\$1	\$0	\$1	\$1	\$1	\$1	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	--	--	--
NSR Royalty																			
Total Revenue	C\$M	\$5,165	--	\$561	\$395	\$421	\$384	\$455	\$474	\$566	\$433	\$366	\$322	\$338	\$296	\$154	--	--	--
Less: Refining & Transport Costs	C\$M	\$6	--	\$1	\$0	\$1	\$0	\$1	\$1	\$1	\$1	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	--	--	--
Total Net Revenue	C\$M	\$5,159	--	\$560	\$395	\$420	\$384	\$454	\$473	\$566	\$433	\$365	\$322	\$338	\$295	\$154	--	--	--
NSR Royalty	%	0.8%	--	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	--	--	--
Royalties	C\$M	\$41	--	\$4	\$3	\$3	\$3	\$4	\$4	\$5	\$3	\$3	\$3	\$3	\$2	\$1	--	--	--
Cash Costs																			
Cash Cost *	US\$/oz Au	\$786	--	\$519	\$803	\$757	\$960	\$867	\$894	\$783	\$812	\$693	\$757	\$799	\$811	\$920	--	--	--
All-in Sustaining Cost (AISC) **	US\$/oz Au	\$965	--	\$860	\$939	\$1,089	\$1,159	\$1,044	\$997	\$873	\$951	\$871	\$953	\$941	\$866	\$1,142	--	--	--
Capital Expenditure																			
Total Initial Capital	C\$M	\$353	\$353	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Mining + Pre-stripping	C\$M	\$75	\$75	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Mining Infrastructure	C\$M	\$10	\$10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
On Site Infrastructure	C\$M	\$50	\$50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Process Plant	C\$M	\$129	\$129	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Off-site Infrastructure	C\$M	\$4	\$4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Project Indirects	C\$M	\$8	\$8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Project Delivery	C\$M	\$27	\$27	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Owner's Costs	C\$M	\$10	\$10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Provisions	C\$M	\$39	\$39	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Total Sustaining Capital	C\$M	\$602	--	\$128	\$36	\$93	\$51	\$54	\$32	\$34	\$40	\$43	\$42	\$32	\$11	\$6	\$0	--	--
Mining	C\$M	\$484	--	\$121	\$28	\$15	\$48	\$42	\$31	\$32	\$38	\$41	\$40	\$30	\$10	\$5	\$0	--	--
Mining Infrastructure	C\$M	\$6	--	--	\$2	\$4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
On-site Infrastructure	C\$M	\$27	--	--	\$2	\$18	--	\$7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Process Plant	C\$M	\$36	--	\$0	\$1	\$35	\$0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Project Indirects	C\$M	\$3	--	\$0	\$0	\$2	\$0	\$0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Project Delivery	C\$M	\$8	--	\$0	\$1	\$7	\$0	\$1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Provisions	C\$M	\$38	--	\$6	\$2	\$12	\$2	\$3	\$2	\$2	\$2	\$2	\$2	\$2	\$1	\$0	\$0	--	--
Closure Cost	C\$M	\$30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	\$30	--	--	--
Salvage Value	C\$M	(\$13)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	(\$13)	--	--	--
Total Capital Expenditure Including Salvage Value	C\$M	\$971	\$353	\$128	\$36	\$93	\$51	\$54	\$32	\$34	\$40	\$43	\$42	\$32	\$11	\$23	\$0	--	--

Notes: * Cash costs consist of mining costs, processing costs, mine-level G&A, refining charges, and royalties. ** AISC includes cash costs plus sustaining capital, closure costs, and salvage value. Source: Ausenco, 2021.

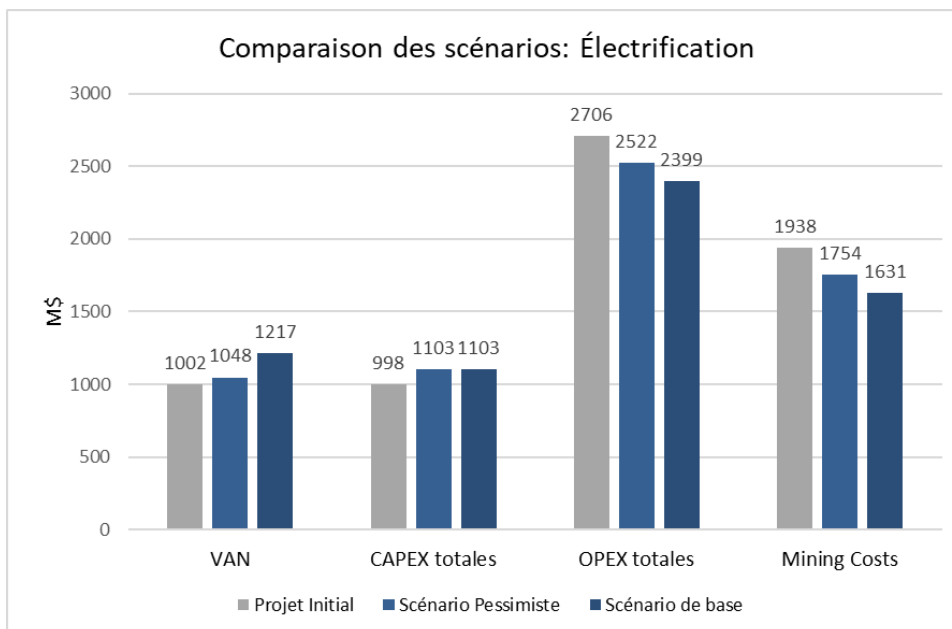
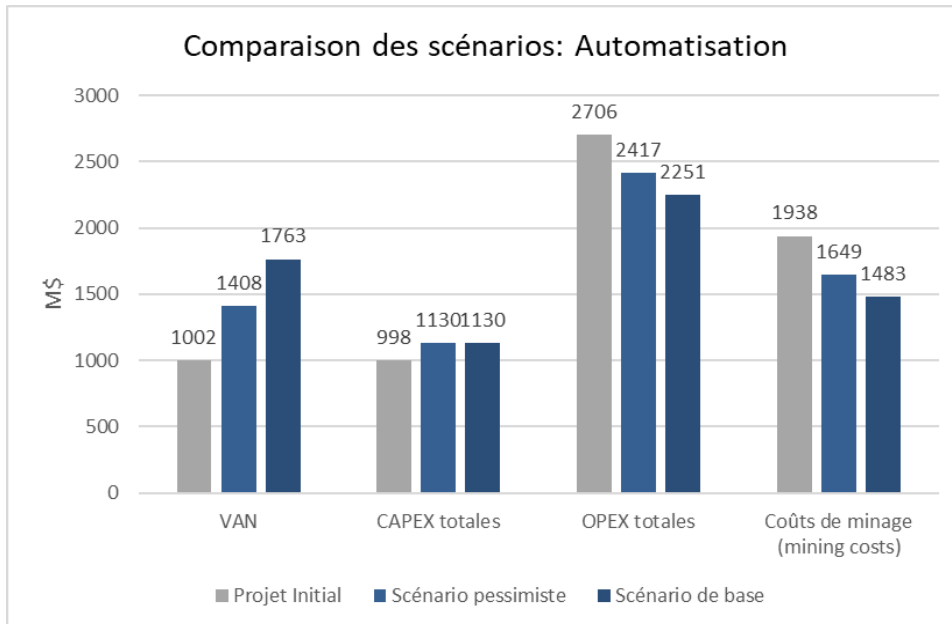
Source :(Raponi et al., 2021), p. 358

14.3.4 Flux financiers du projet initial

(M\$)	Année	Preceding years	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL	
FLUX REVENUS D'OPÉRATIONS	(Plus) Revenue	0	561.0	395.0	421.0	384.0	455.0	474.0	566.0	433.0	366.0	322.0	338.0	296.0	154.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	5165
FLUX DÉPENSES D'OPÉRATIONS DÉPENSES	Mining costs	0.0	136.0	155.0	156.0	183.0	200.0	219.0	231.0	172.0	107.0	101.0	118.0	98.0	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1938.0
	Process Operating Costs	0.0	44.0	44.0	44.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	604.0
	Environment and tailings	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	G&A	0.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0
	Transport, Smelting and Refining	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6
	Royalty payments	0.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0
	(Minus) TOTAL OPEX	0	194.0	211.0	213.0	245.0	264.0	283.0	296.0	235.0	169.0	163.0	180.0	159.0	94.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2706
CAPITAL EXPENDITURES	Preproduction Mining	353.0 71.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	353.0
	Sustaining Mining	0.0	128.0 36	36.0 93	93.0 51	51.0 54	54.0 32	32.0 34	34.0 40	40.0 43	43.0 42	42.0 32	32.0 11	11.0 6	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	602.0
	Reclamation and closure	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0
	Salvage Value	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0
	(Minus) TOTAL CAPEX	353.0	128.0	36.0	93.0	51.0	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	998.0
	(Minus) Change in Working Capital	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PRE-TAX CASH FLOW (Non-discounted)	(=)	-353.0	239.0	148.0	115.0	88.0	137.0	159.0	236.0	158.0	154.0	117.0	126.0	126.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1461.0
Cumulative CASH FLOWS (Non-discounted)		-353.0	-114.0	34.0	149.0	237.0	374.0	533.0	769.0	927.0	1081.0	1198.0	1324.0	1450.0	1461.0	1461.0	1461.0	1461.0	1461.0	1461.0	1461.0	1461.0	1461.0
DISCOUNTED PRE-TAX CF		-353.0	227.6	134.2	99.3	72.4	107.3	118.6	167.7	106.9	99.3	71.8	73.7	70.2	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1002.0
																							VAN Scénario de base (M\$) 1002.0
																							TRI Scénario de base Récupération du capital 47%
																							1.77 années

14.4 Résultats détaillés des simulations financières

14.4.1 Comparaison des scénarios



14.4.1.1 Flux financiers - Scénario de base : Automatisation des LHDs et des camions

Automatisation des LHDs et des camions																						
(M)	Année	Preceding years	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL
FLUX REVENUS D'OPÉRATIONS																						
	(Plus) Revenues sans innovation	0.00	639.54	450.30	479.94	437.76	518.7	540.4	645.2	493.6	417.2	367.1	385.3	337.4	175.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5888.1
	Gain de productivité	0	561	395	421	384	465.0	474.0	566.0	433.0	366.0	322.0	338.0	296.0	154.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5165
FLUX DÉPENSES D'OPÉRATIONS DÉPENSES																						
	Mining costs avec innovation	0.00	104.04	118.58	119.34	140.00	153.0	167.5	176.7	131.6	81.9	77.3	90.3	75.0	47.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1482.6
	Salaires Main-d'œuvre directe	-20.40	-23.25	-23.40	-27.45	-30.0	-32.9	-34.7	-25.8	-16.1	-15.2	-17.7	-14.7	-9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-290.70
	Carburant	-4.08	-4.65	-4.68	-5.49	-6.0	-6.6	-6.9	-5.2	-3.2	-3.0	-3.5	-2.9	-1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-58.14
	Maintenance	-5.44	-6.20	-6.24	-7.32	-8.0	-8.8	-9.2	-6.9	-4.3	-4.0	-4.7	-3.9	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-77.52
	Ventilation	-2.04	-2.23	-2.34	-2.75	-3.0	-3.3	-3.5	-2.6	-1.6	-1.5	-1.8	-1.5	-0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-29.07
	Climateation																					
	Mining costs initiaux	0.00	136.00	155.00	156.00	183.00	200.0	219.0	231.0	172.0	107.0	101.0	118.0	98.0	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1938.0
	Process Operating Costs	0.00	44.00	44.00	44.00	50.00	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	604.0
	Environment and tailings	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	G&A	0.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0
	Transport, Smelting and Refining	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6
	Royalty payments	0.00	4.00	3.00	3.00	3.00	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0
	Total Opex sans innovation	0.00	194.00	211.00	213.00	245.00	264.0	283.0	296.0	235.0	169.0	163.0	180.0	159.0	94.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2706.00
	(Minus) TOTAL Opex innovation	0.00	162.04	174.58	176.34	202.00	217.0	231.5	241.7	194.6	143.9	139.3	152.3	136.0	79.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2250.6
CAPITAL EXPENDITURES																						
	Preproduction avec innovation	403.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	403.5
	Coûts supérieurs des camions et LHDs infrastructures connexes	16.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Preproduction initiale	33.55																				
	Sustaining avec innovation	0.00	158.72	39.86	102.97	56.47	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	683.51
	Coûts supérieurs des camions et LHDs	30.72	3.86	9.97	5.47	5.8	3.4	3.6	4.3	4.6	4.5	3.4	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.51
	Sustaining initial	0.00	128.00	36.00	93.00	51.00	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	602.0
	Reclamation and closure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0
	Salvage Value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0
	TOTAL CAPEX SANS INNOVATION	353.00	128.00	36.00	93.00	51.00	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	998.0
	(Minus) TOTAL CAPEX innovation	403.49	158.72	39.86	102.97	56.47	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	49.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1130.0
	(Minus) Change in Working Capital	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PRE-TAX CASH FLOW (Non-discounted)																						
	(-)	-403.49	318.78	235.87	200.63	179.30	241.9	273.4	365.9	254.8	225.8	181.3	197.6	189.3	46.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2507.5
Cumulative CASH FLOWS (Non-discounted)																						
		-403.5	-84.7	151.2	351.8	531.1	773.0	1046.4	1412.3	1667.0	1892.8	2074.1	2271.7	2461.0	2307.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5
DISCOUNTED PRE-TAX CF																						
		-403.49	303.60	213.94	173.32	147.51	189.5	204.0	260.0	172.4	145.5	111.3	115.5	105.4	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1763.3
Taux d'actualisation de base																					5%	
																					VAN avec innovation: 1763 TRI Récupératio In du capital: 65% 14 années	

14.4.1.3 Flux financiers - Scénario pessimiste : Automatisation des LHDs et des camions et choc d'arrêt de la production de 2 mois

Automatisation des LHDs et des camions																						
(M)	Année	Preceding year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL
FLUX REVENUS D'OPÉRATIONS																						
	(Plus) Revenues	0.00	495.55	426.60	454.68	414.72	491.4	511.9	611.3	467.6	395.3	347.8	365.0	319.7	166.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5467.87
	Revenues sans innovation	0	561	395	421	384	405.0	474.0	566.0	433.0	366.0	322.0	338.0	296.0	154.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5385
	Gain de productivité		1.06	1.08	1.08	1.08	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1							
	Choc d'arrêt de la production		-0.17																			
FLUX DÉPENSES D'OPÉRATIONS DÉPENSES																						
	Mining costs avec innovation	0.00	115.74	131.91	132.76	155.73	170.2	186.4	196.6	146.4	91.1	86.0	100.4	83.4	53.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1543.2
	Solaires Moins d'arroseur directe		-12.24	-13.95	-14.04	-16.47	-18.0	-19.7	-20.8	-15.5	-9.6	-9.1	-10.6	-8.8	-5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-174.42
	Carburant		-2.04	-2.33	-2.34	-2.75	-3.0	-3.3	-3.5	-2.6	-1.6	-1.5	-1.8	-1.5	-0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-29.07
	Maintenance		-2.72	-3.10	-3.12	-3.66	-4.0	-4.4	-4.6	-3.4	-2.1	-2.0	-2.4	-2.0	-1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-38.76
	Ventilation		-3.26	-3.72	-3.74	-4.39	-4.8	-5.3	-5.5	-4.1	-2.6	-2.4	-2.8	-2.4	-1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-45.51
	Classification																					
	Mining costs initiaux	0.00	136.00	155.00	156.00	183.00	200.0	219.0	231.0	172.0	107.0	101.0	118.0	98.0	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1938.0
	Process Operating Costs	0.00	44.00	44.00	44.00	50.00	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	604.0
	Environment and tailings	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	GSA	0.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0
	Transport, Smelting and Refining	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6
	Royalty payments	0.00	4.00	3.00	3.00	3.00	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0
	Total Opex sans innovation	0.00	194.00	211.00	211.00	245.00	264.0	281.0	296.0	236.0	169.0	163.0	180.0	159.0	94.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2706.00
	(Minus) TOTAL OPEX Innovation	0.00	173.74	187.91	189.76	217.73	234.2	250.4	261.6	209.4	153.1	148.0	162.4	144.4	84.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2417.2
CAPITAL EXPENDITURES																						
	Preproduction avec innovation	403.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	403.5
	Coûts supérieurs des camions et LHDs	16.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Infrastructures communes	33.55																				
	Preproduction initiale	353.00																				
	Sustaining avec innovation	0.00	158.72	39.86	102.97	56.47	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	683.53
	Coûts supérieurs des camions et LHDs	30.72	3.86	9.97	5.47	5.8	3.4	3.6	4.3	4.6	4.5	3.4	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.51
	Sustaining initial	0.00	128.00	36.00	93.00	51.00	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	602.0
	Reclamation and closure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0
	Scrapage Value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0
	TOTAL CAPEX SANS INNOVATION	353.00	128.00	36.00	93.00	51.00	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	998.0
	(Minus) TOTAL CAPEX Innovation	403.49	158.72	39.86	102.97	56.47	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	49.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1190.0
	(Minus) Change in Working Capital	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PRE-TAX CASH FLOW (Non-Discounted)																						
	(+) Cumulative CASH FLOWS (Non-Discounted)	-403.49	163.09	198.84	161.96	140.52	197.4	226.1	312.1	234.0	194.6	153.3	167.2	163.1	31.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1503.6
	(-) DISCOUNTED PRE-TAX CF	-403.49	163.39	180.35	139.91	115.61	154.7	168.7	221.8	148.8	126.5	94.1	97.8	90.8	36.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1302.8
																					VAN automatisé et choc interruption (MS)	1303
																					TRI	44%
																					Récupération du capital	2.2 années
																					Choc interruption de la production	2 année
																					VAN avec innovation (automatisé)	1408
																					TRI	54%
																					Récupération du capital	1.7 années
Taux d'actualisation de base		5%																				

14.4.1.4 Flux financiers - Scénario de base : Électrification des LHDs et des camions

Électrification des LHDs et des camions																							
(M)	Année	Preceding years	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL	
FLUX REVENUS D'OPÉRATIONS	(Plus) Revenu	0.0	572.2	402.9	429.4	391.7	464.1	483.5	577.3	441.7	373.3	328.4	344.8	301.9	157.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5268.3	
	Revenus sans innovation	0.0	561.0	395.0	421.0	384.0	455.0	474.0	566.0	433.0	366.0	322.0	338.0	296.0	154.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5165
	Gain de productivité		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0								
FLUX DÉPENSES D'OPÉRATIONS DÉPENSES	Mining costs avec innovation	0.0	114.4	130.4	131.3	154.0	168.3	184.3	194.4	144.7	90.0	85.0	99.3	82.5	52.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1630.8	
	Carburant		-15.3	-17.4	-17.6	-20.6	-22.5	-24.6	-26.0	-19.4	-12.0	-11.4	-13.3	-11.0	-7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-218.03	
	Maintenance		-5.4	-6.2	-6.2	-7.3	-8.0	-8.8	-9.2	-6.9	-4.3	-4.0	-4.7	-3.9	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-77.52	
	Ventilation		-0.8	-0.9	-0.9	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.0	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-11.63
	Climatisation																						0.00
	Mining costs Initiaux	0.0	136.0	155.0	156.0	183.0	200.0	219.0	231.0	172.0	107.0	101.0	118.0	98.0	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1998.0
	Process Operating Costs	0.0	44.0	44.0	44.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	604.0
	Environment and tailings	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	G&A	0.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0
	Transport, Smelting and Refining	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6
	Royalty payments	0.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0
	Total Opex sans innovation	0.0	194.0	211.0	213.0	245.0	264.0	283.0	296.0	235.0	169.0	163.0	180.0	159.0	94.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2706.00
	(Minus) TOTAL OPEX Innovation	0.0	172.4	186.4	188.3	216.0	232.3	248.3	259.4	207.7	152.0	147.0	161.3	143.5	84.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2398.8
	CAPITAL EXPENDITURES	Preproduction avec innovation	376.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	376.9
Coûts supérieurs des camions élec		16.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.9	
Infrastructures connexes		7.0																					
Preproduction initiale		353.0																					
Sustaining avec innovation		0.0	158.7	39.9	103.0	56.5	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	683.51	
Coûts supérieurs des camions et LHDs électriques			30.7	3.9	10.0	5.5	5.8	3.4	3.6	4.3	4.6	4.5	3.4	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.51
Sustaining initial		0.0	128.0	36.0	93.0	51.0	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	602.0
Reclamation and closure		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0
Salvage Value		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0
Effet																							
TOTAL CAPEX SANS INNOVATION	353.0	128.0	36.0	93.0	51.0	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	998.0	
(Minus) TOTAL CAPEX Innovation	376.9	158.7	39.9	103.0	56.5	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	49.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1103.5	
(Minus) Change in Working Capital	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
PRE-TAX CASH FLOW (Non-discounted)	(-)	-376.9	241.1	176.6	138.2	119.2	172.0	199.8	280.3	189.6	173.7	134.9	148.0	146.3	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1766.0	
Cumulative CASH FLOWS (Non-discounted)		-376.9	-135.9	40.7	178.9	298.1	470.1	669.9	950.2	1139.8	1313.5	1448.4	1596.5	1742.8	1766.0	1766.0	1766.0	1766.0	1766.0	1766.0	1766.0	1766.0	
DISCOUNTED PRE-TAX CF		-376.9	229.6	160.2	119.4	98.1	134.8	149.1	199.2	128.4	112.0	82.8	86.6	81.5	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1216.8	

IFRS avec innovation 1217
 IFRS Récupération du capital 50%
 1.77 années

14.4.1.5 Flux financiers - Scénario de base : Automatisation des LHDs et des camions

Automatisation des LHDs et des camions																							
(M)	Année	Preceding years	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL	
FLUX REVENUS D'OPÉRATIONS																							
	(Plus) Revenu Revenus sans innovation	0.00	639.54	450.30	479.94	437.76	518.7	540.4	645.2	493.6	417.2	367.1	385.3	337.4	175.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5888.1
	Gain de productivité		1.14	1.14	1.14	1.14	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1								5165
FLUX DÉPENSES D'OPÉRATIONS DÉPENSES																							
	Mining costs avec innovation	0.00	104.04	118.58	119.34	140.00	153.0	167.5	176.7	131.6	81.9	77.3	90.3	75.0	47.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1482.6
	Salaires Main-d'œuvre directe		-20.40	-23.25	-23.40	-27.45	-30.0	-32.9	-34.7	-25.8	-16.1	-15.2	-17.7	-14.7	-9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-290.70
	Carburant		-4.08	-4.65	-4.68	-5.49	-6.0	-6.6	-6.9	-5.2	-3.2	-3.0	-3.5	-2.9	-1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-58.14
	Maintenance		-5.44	-6.20	-6.24	-7.32	-8.0	-8.8	-9.2	-6.9	-4.3	-4.0	-4.7	-3.9	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-77.52
	Ventilation		-2.04	-2.23	-2.34	-2.75	-3.0	-3.3	-3.5	-2.6	-1.6	-1.5	-1.8	-1.5	-0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-29.07
	Climateation																						
	Mining costs initiaux	0.00	136.00	155.00	156.00	183.00	200.0	219.0	231.0	172.0	107.0	101.0	118.0	98.0	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1938.0
	Process Operating Costs	0.00	44.00	44.00	44.00	50.00	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	604.0
	Environment and tailings	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	G&A	0.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0
	Transport, Smelting and Refining	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6
	Royalty payments	0.00	4.00	3.00	3.00	3.00	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0
	Total Opex sans innovation	0.00	194.00	211.00	213.00	245.00	264.0	283.0	296.0	235.0	169.0	163.0	180.0	159.0	94.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2706.00
	(Minus) TOTAL Opex innovation	0.00	162.04	174.58	176.34	202.00	217.0	231.5	241.7	194.6	143.9	139.3	152.3	136.0	79.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2250.6
CAPITAL EXPENDITURES																							
	Preproduction avec innovation	403.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	403.5
	Coûts supérieurs des camions et LHDs	16.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Infrastructures connexes	33.55																					
	Preproduction initiale	353.00																					
	Sustaining avec innovation	0.00	158.72	39.86	102.97	56.47	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	683.51
	Coûts supérieurs des camions et LHDs		30.72	3.86	9.97	5.47	5.8	3.4	3.6	4.3	4.6	4.5	3.4	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.51
	Sustaining initial	0.00	128.00	36.00	93.00	51.00	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	602.0
	Reclamation and closure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0
	Salvage Value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0
	TOTAL CAPEX SANS INNOVATION	353.00	128.00	36.00	93.00	51.00	54.0	32.0	34.0	40.0	43.0	42.0	32.0	11.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	998.0
	(Minus) TOTAL CAPEX Innovation	403.49	158.72	39.86	102.97	56.47	59.8	35.4	37.6	44.3	47.6	46.5	35.4	12.2	49.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1130.0
	(Minus) Change in Working Capital	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PRE-TAX CASH FLOW (Non-discounted)																							
	(=)	-403.49	318.78	235.87	200.63	179.30	241.9	273.4	365.9	254.8	225.8	181.3	197.6	189.3	46.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2507.5
Cumulative CASH FLOWS (Non-discounted)																							
	(=)	-403.5	-84.7	151.2	351.8	531.1	773.0	1046.4	1412.3	1667.0	1892.8	2074.1	2271.7	2461.0	2307.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5	2507.5
DISCOUNTED PRE-TAX CF																							
	(=)	-403.49	303.60	213.94	173.32	147.51	189.5	204.0	260.0	172.4	145.5	111.3	115.5	105.4	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1763.3

VAN avec innovation 1763
 TRI 65%
 Récupération du capital 14 années

14.5 Annexe 4 : Guide d'entrevues

Projets miniers : Innovation & ESG

Outil de cueillette de données – Entrevues

Le guide suivant est un guide non exhaustif du type de questions posées aux intervenants des entreprises minières, de prestataires gravitant autour des entreprises minières (équipementiers, consultants spécialisés, etc.) et des investisseurs du secteur minier.

Les répondants peuvent demander à tout moment de ne pas répondre à une question.

VOLET FINANCEMENT DE PROJET

a) Faisabilité de l'introduction d'innovations dans l'élaboration des projections financières pour les projets d'investissement

Selon vos connaissances autour du processus d'élaboration des projections financières dans les rapports de faisabilité:

- Quelle serait la part d'investissements dédiés à des technologies d'innovation par rapport au total des capitaux engagés dans un projet ?
 - Les dépenses d'investissements doivent-elles nécessairement être engagées en phase de préproduction, ou est-il faisable d'engager de nouveaux investissements ultérieurement en cours de projet ?
 - Il semblerait que les risques autour de l'adoption d'innovations l'emportent souvent sur les bénéfices opérationnels. Dans quelle mesure cela est-il le cas selon vous ?
 - De quelle manière l'introduction d'innovations peut-elle améliorer les revenus et les coûts d'opération ?
 - Pouvez-vous préciser quels coûts seraient concernés ?
 - Quel est le type de risque induit par l'adoption d'innovations ?
 - Percevez-vous ce risque comme particulièrement élevé ?
 - Avez-vous eu l'opportunité d'examiner les potentiels opérationnels permis par les nouvelles technologies numériques ou autres pour d'autres mines à l'extérieur du Québec ?
 - Le fait que la mine ne soit pas connectée au réseau d'Hydro-QC ou au réseau télécom a-t-il une influence sur l'adoption d'innovations ?
- b) Comprendre les processus de décision d'intégration des investissements en innovation dans les projets ?**

- D'après vos connaissances, y a-t-il des innovations considérées au départ qui finalement ne sont pas retenues ? Pourquoi ?
- Qui prend ultimement la décision d'engager des capitaux pour implémenter des technologies d'innovation dans le projet minier ?
 - Quel est le rôle des consultants sur la faisabilité des projets à ce sujet ?
 - Comment se déroulent les discussions avec les opérateurs miniers ?
- Quelle est l'implication des équipementiers dans le processus d'élaboration du projet ? Est-il possible d'intégrer des solutions standard, ou est-il nécessaire de concevoir des solutions personnalisées ?
- Pouvez-vous nous parler du profil des investisseurs/pourvoyeurs de capital intéressés dans les projets miniers ?

VOLET ESG

a) Considérations générales

- À quel(s) moment(s) des phases d'exploration ou d'exploitation des mines ont lieu des évaluations relatives aux facteurs ESG ? Est-ce que cela induit une rédaction de rapports spécifiques ? À quelles échéances ?
- Quels objectifs sont associés à cette démarche de divulgation ESG ?
 - Convaincre
 - Transparence
 - Obligation réglementaire
 - ...
- Quels sont les destinataires de ces informations et du travail qui est effectué pour la divulgation ESG ?
 - Investisseurs,
 - Grand public
 - Actionnaires,
 - Gouvernement,
 - ...
- Selon l'hypothèse que l'adoption d'une innovation représente un surcoût très élevé, qui doit supporter le plus fortement le coût supplémentaire de l'innovation à adopter ?
- Quelle place ont les facteurs ESG dans la valorisation d'une innovation et dans sa potentielle adoption ?

b) Projets miniers dans des portefeuilles sous contraintes ESG

Cette section vise uniquement les investisseurs miniers.

- Quels sont les enjeux liés à l'investissement dans le secteur minier ?
 - Fait-il l'objet d'une exclusion systématique selon vos critères ?

- Si oui, pour quelles raisons ?
 - Si non, quelles sont les raisons pour conserver ce secteur dans votre portefeuille
- Comment percevez-vous le niveau de transparence du secteur minier sur les facteurs ESG ?
 - Y a-t-il des améliorations à apporter ? Lesquels ? Pourquoi ?
 - Est-il comparable à d'autres secteurs ?
 - Quels sont les secteurs qui font figure d'exemples en termes de divulgation ESG ? Pour quelles raisons ?
 - Quels sont les conseils que vous pouvez apporter à une entreprise minière pour qu'elle rentre dans votre portefeuille d'investissement ?
- Y a-t-il des différences d'approche pour le financement de projets miniers ?
 - Prêts ou investissement ?
 - Prise de participation
 - Montage financier
- À quel moment s'effectue l'investissement dans une mine ?
 - Avant le démarrage
 - Après le démarrage
- Quels sont les cadres sur lesquels vous vous appuyez pour évaluer la performance ESG d'une entreprise minière ?
- Quel est votre niveau de considération des rapports environnementaux des projets miniers ?
 - Notamment lors de l'étape de faisabilité
- Quelle est la valeur que vous donnez au financement d'innovations par les entreprises minières ?
 - Comment considérez-vous des innovations
 - en termes de processus ?
 - en termes de produits ?
- Comment évaluez-vous l'innovation dans votre gestion de risque relié à l'investissement dans un projet minier ?
 - Dans le cas d'une surcote du niveau de risque, quels sont les déterminants ?
 - Les délais en jeu
 - La rentabilité
 - L'incertitude des ressources
 - Autres ?
- Quelle distinction faites-vous entre la performance ESG annuelle et le plan de transition d'une compagnie minière ?
 - Quels éléments sont privilégiés ?
 - Pour quelles raisons
 - Quels critères sont considérés
 - GES
 - Biodiversité

- Consommation d'eau
 - Protection des salariés
 - Corruption
 - Interaction avec les peuples autochtones
- Quelle veille est faite du comportement des entreprises minières dans leur comportement ESG ?

c) **Rapports ESG**

- Quels sont les rapports que vous produisez dans le cadre de vos analyses ESG ?
- Quelle est la fréquence de révision des données ESG disponibles ?
 - Quelles sont les sources ?
 - Qui se charge de la rédaction de ces rapports ?
 - Quel cadre est utilisé pour la rédaction des rapports ?
- Quelle distinction est faite entre les rapports ESG et les rapports de RSE ?
 - Pourquoi ?

d) **Connaissances ESG**

- Avez-vous été formé ou sensibilisé à l'ESG ?
 - À quoi spécifiquement dans l'ESG ?
 - Dans quel contexte :
 - Formation universitaire/scolaire
 - Formation proposée par l'entreprise
 - Intérêt personnel
 - Quels sont les éléments retenus et utiles dans votre quotidien ?
- Est-ce que des programmes de formation et de compréhension des normes et cadres de divulgation liés à l'ESG existent dans votre entreprise ? Lesquels ?

e) **Outils ESG**

- Quels sont les types d'outils que vous utilisez dans le cadre de votre rôle pour vos évaluations ESG ?
 - [Si aucun ou très peu]: Pourquoi n'utilisez-vous pas ces outils ?
 - Est-ce ce sont des outils in-house, achetés à un fournisseur externe, ou avec un abonnement auprès d'un fournisseur, ou autre ?
 - Quelle formation avez-vous reçue pour appréhender ces outils et leur impact ?
 - Pouvez-vous nous décrire votre utilisation (fréquence, nature, pour quels processus, etc.)
 - Quelles difficultés avez-vous rencontrées dans votre appréhension de ces outils ?
 - Pourquoi ?

- À votre connaissance, existe-t-il des solutions qui pourraient vous aider à résoudre vos difficultés ?
 - Si oui, quelles sont les contraintes qui vous empêchent de régler ce problème ?
- Avez-vous rencontré des difficultés à intégrer ces outils dans vos processus ?

f) **ESG et innovation**

- En quoi selon vous les facteurs ESG peuvent-ils contribuer à pousser l'adoption d'innovation ?
- Quelle est votre perception des nouvelles réglementations ESG ?
 - Y a-t-il des inquiétudes sur des contraintes à considérer ?
 - Y a-t-il des pressions internes qui poussent à considérer davantage ces facteurs ESG
- Est-ce que les innovations doivent nécessairement apporter une amélioration des critères ESG ?
 - À quel niveau ?
 - Est-ce qu'elles peuvent au contraire dégrader ces critères s'ils ne sont pas considérés en bonne et due forme ?

15 Bibliographie

- Agnico Eagle. (2023a). *Agnico Eagle Mines Limited—Sustainability—Our Approach and Commitments*. <https://www.agnicoeagle.com/English/sustainability/our-approach-and-commitments/default.aspx>
- Agnico Eagle. (2023b). *Mine Canadian Malartic*. MCM ET MINE ODYSSEY. <https://malartic.agnicoeagle.com/fr/a-propos/mine-canadian-malartic/>
- Ajay Lala, Mukani Moyo, Stefan Rehbach, & Richard Sellschop. (2015). *Productivity in mining operations : Reversing the downward trend* (Metals & Mining Practice). McKinsey. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Metals%20and%20Mining/Our%20Insights/Productivity%20in%20mining%20operations%20Reversing%20the%20downward%20trend/Productivity%20in%20mining%20operations%20Reversing%20the%20downward%20trend.pdf>
- AMC. (2022). *VDMD 101 : Introduction*. <https://mining.ca/fr/ressources/guides-manuels/vdmd-101-introduction/>
- AMQ. (s. d.). *L'Industrie minière—Industrie minière—Association Minière du Québec*. Consulté 2 octobre 2023, à l'adresse <https://intranet.amq-inc.com/lindustrie-mini%C3%A9re/industrie-mini%C3%A9re>
- Andrew, J., & Cortese, C. L. (2011). *Carbon Disclosures : Comparability, the Carbon Disclosure Project and the Greenhouse Gas Protocol*. 16.
- Annie Royer, Nathalie de Marcellis-Warin, Ingrid Peignier, & Thierry Warin. (2021). *Le Québec économique 9—Chapitre 16—La révolution numérique appliquée à l'agriculture au Québec* (CIRANO, Vol. 2020CH-16). <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2020CH-16>
- Annie Royer, Nathalie de Marcellis-Warin, Ingrid Peignier, Thierry Warin, Molivann Panot, & Christophe Mondin. (2020). *Les enjeux du numérique dans le secteur agricole—Défis et opportunités* (Rapport de projets 2020RP-12). CIRANO. <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2020RP-12>
- Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H., & Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>
- Barnett, R. & Lopez, L. (2012). *The Rise of the Machines*.
- Beatriz Calzada Olvera, & Michiko Iizuka. (2020). *How does innovation take place in the mining industry.pdf*. UNU-MERIT Working Papers.
- Bellamy, D., & Pravica, L. (2011). Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. *Resources Policy*, 36(2), 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.09.002>
- BHP. (2017). *Driving value through excellence in maintenance*. BHP.

- <https://www.bhp.com/news/case-studies/2017/09/driving-value-through-excellence-in-maintenance>
- BHP. (2019). *Automation data is making work safer, smarter and faster*. BHP. <https://www.bhp.com/news/articles/2019/07/automation-data-is-making-work-safer-smarter-and-faster>
- BMT. (2019, octobre 16). <https://blastmovement.com/sales-quotation/>
- Bos, J. (2014). Using ESG Factors for Equity Valuation. *CFA Institute Magazine*. <https://www.cfainstitute.org/-/media/documents/article/cfa-magazine/2014/cfm-v25-n6-5.ashx3>
- Bowen, G. (2008). Naturalistic Inquiry and the Saturation Concept : A Research Note. *Qualitative Research - QUAL RES*, 8, 137-152. <https://doi.org/10.1177/1468794107085301>
- Buia, C., Heyning, C., & Lander, F. (2018). *The risks and rewards of outsourcing*.
- Caiazza, R., & Volpe, T. (2017). Innovation and its diffusion : Process, actors and actions. *Technology Analysis & Strategic Management*, 29(2), 181-189. <https://doi.org/10.1080/09537325.2016.1211262>
- CBD. (2022). *Cadre Mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal*. <https://www.cbd.int/doc/c/0bde/b7c0/00c058bbfd77574515f170bd/cop-15-l-25-fr.pdf>
- CCNID. (2023). *Communiqué de presse : L'entrée en fonction du CCNID, grâce à de nouvelles nominations, coïncide avec la publication des premières normes de l'ISSB*. <https://www.frascanada.ca/fr/ccnid/nouvelles/ccnid-nouvelles-nominations-2023>
- CDP. (2023). *THE BENEFITS OF DISCLOSURE 2023*. https://cdn.cdp.net/cdp-production/comfy/cms/files/files/000/007/895/original/CDP_Benefits_of_Disclosure_May_2023__%281%29.pptx
- Chen, Y., & Yue, J. (2022). *ESG practices and the cost of capital : Evidence from CA100+ companies*. https://www.afte.com/sites/default/files/inline-files/Mémoire%20du%201er%20prix%20-%20CHEN%20-%20YUE%20V%20Site_2.pdf
- Cho, C. H., Laine, M., Roberts, R. W., & Rodrigue, M. (2015). Organized hypocrisy, organizational façades, and sustainability reporting. *Accounting, Organizations and Society*, 40, 78-94. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2014.12.003>
- Christensen, H. B., Floyd, E., Liu, L. Y., & Maffett, M. (2017). The real effects of mandated information on social responsibility in financial reports : Evidence from mine-safety records. *Journal of Accounting and Economics*, 64(2), 284-304. <https://doi.org/10.1016/j.jacceco.2017.08.001>
- Comité Sectoriel de la main d'oeuvre de l'industrie des mines. (2021). *Carte des Mines du Québec*.

- Conseil des ressources humaines de l'industrie minière (Conseil RHim). (2020). *LA NATURE CHANGEANTE DU TRAVAIL - INNOVATION, AUTOMATISATION ET MAIN-D'ŒUVRE DE L'INDUSTRIE MINIÈRE AU CANADA*. https://mihr.ca/wp-content/uploads/2020/05/MIHR_Innovation_Report_FR_WEB.pdf?fbclid=IwAR1JsVz_Ab6ISep52QbSKbePaL9MJ3qaZt5rFvddxJJuFN2LSlaW63NUpt0
- Corporate Reporting Dialogue. (2019). *Driving Alignment in Climate-related Reporting*. https://www.integratedreporting.org/wp-content/uploads/2019/09/CRD_BAP_Report_2019.pdf
- Cosbey, A., Mann, H., Maennling, N., Toledano, P., Geipel, J., & Brauch, M. D. (2016). *Mining a Mirage? Reassessing the shared-value paradigm in light of the technological advances in the mining sector*.
- Costa, L. de V., & Silva, J. M. da. (2020). Strategies used to control the costs of underground ventilation in some Brazilian mines. *REM - International Engineering Journal*, 73, 555-560. <https://doi.org/10.1590/0370-44672019730057>
- Costa Lima, G. A., & Suslick, S. B. (2006). Estimating the volatility of mining projects considering price and operating cost uncertainties. *Resources Policy*, 31(2), 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2006.07.002>
- Crifo, P., Forget, V. D., & Teyssier, S. (2015). The price of environmental, social and governance practice disclosure : An experiment with professional private equity investors. *Journal of Corporate Finance*, 30, 168-194. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2014.12.006>
- Crosse, G. (2022, décembre 31). Predictions and protection : Can software and data improve ESG in mining? *Mining Technology*. <https://www.mining-technology.com/features/mining-esg-data-regulation/>
- CSIRO. (s. d.). *MRI for rapid copper ore sorting*. CSIRO. Consulté 10 mai 2023, à l'adresse <https://www.csiro.au/en/work-with-us/industries/mining-resources/sensing/ore-sorter>
- Daly, A., Humphreys, D., Raffo, J. D., & Valacchi, G. (2022a). Global Challenges for Innovation in the Mining Industries. In A. Daly, D. Humphreys, G. Valacchi, & J. Raffo (Éds.), *Global Challenges for Innovation in Mining Industries* (p. 1-24). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108904209.002>
- Daly, A., Humphreys, D., Raffo, J. D., & Valacchi, G. (2023). *Global Challenges for Innovation in Mining Industries*.
- Daly, A., Humphreys, D., Raffo, J., & Valacchi, G. (Éds.). (2022b). *Global Challenges for Innovation in Mining Industries*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108904209>
- Dando, N., & Swift, T. (2003). Transparency and Assurance Minding the Credibility Gap. *Journal of Business Ethics*, 44(2), 195-200. <https://doi.org/10.1023/A:1023351816790>

- de Marcellis-Warin, N., Peignier, I., & Gleize, T. (2022). *BAROMÈTRE CIRANO 2022 : La perception des risques au Québec*. <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2022LI-02>
- Del Giudice, A., & Rigamonti, S. (2020). Does Audit Improve the Quality of ESG Scores? Evidence from Corporate Misconduct. *Sustainability*, 12(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/su12145670>
- de Marcellis-Warin, N., Gleize, T., & Morales, M. (Parution prochaine). *IA & Finance Durable—Rapport à paraître*. CIRANO.
- Dubuc, A. (2023, octobre 25). Exploitant de centres de données Vantage Canada : Un investissement de 1,6 milliard échappe au Québec, faute d'électricité. *La Presse*. <https://www.lapresse.ca/affaires/2023-10-25/exploitant-de-centres-de-donnees-vantage-canada/un-investissement-de-1-6-milliard-echappe-au-quebec-faute-d-electricite.php>
- Durrant-Whyte, H., Geraghty, R., Pujol, F., & Sellschop, R. (2015). How digital innovation can improve mining productivity. *McKinsey Company*. https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Chemicals/Our%20Insights/How%20digital%20innovation%20can%20improve%20mining%20productivity/How_digital_innovation_can_improve_mining_productivity.pdf
- Ediriweera, A., & Wiewiora, A. (2021a). Barriers and enablers of technology adoption in the mining industry. *Resources Policy*, 73, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102188>
- Ediriweera, A., & Wiewiora, A. (2021b). Barriers and enablers of technology adoption in the mining industry. *Resources Policy*, 73, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102188>
- El Ghouli, S., Guedhami, O., Kwok, C. C. Y., & Mishra, D. R. (2011). Does corporate social responsibility affect the cost of capital? *Journal of Banking & Finance*, 35(9), 2388-2406. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2011.02.007>
- Emmanuel Faber. (2023, octobre 10). Comptabilité d'entreprise : « Exiger que la matérialité s'étende au-delà du domaine économique est en réalité simpliste ». *Le Monde.fr*. https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/10/10/comptabilite-d-entreprise-exiger-que-la-materialite-s-etende-au-dela-du-domaine-economique-est-en-realite-simpliste_6193607_3232.html
- Engineering & Mining Journal (00958948). (2022). First-of-its-Kind Cat Loader Enters Service in WA Gold Mine. *Engineering & Mining Journal (00958948)*, 223(12), 66-67.
- EY. (2022). *Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2023*. https://www.ey.com/en_ca/mining-metals/risks-opportunities
- Falco Resources. (2023). *2021 ESG Report*. https://onyen.com/published/FRL_2021_Annual_626.html
- Gao, S., Hakanen, E., Töytäri, P., & Rajala, R. (2019, janvier 1). *Digital Transformation in*

Asset-intensive Businesses : Lessons Learned from the Metals and Mining Industry.
<https://doi.org/10.24251/HICSS.2019.593>

- Gjergji, R., Vena, L., Sciascia, S., & Cortesi, A. (2021). The effects of environmental, social and governance disclosure on the cost of capital in small and medium enterprises : The role of family business status. *Business Strategy and the Environment*, 30(1), 683-693. <https://doi.org/10.1002/bse.2647>
- Gleeson, D. (2018). Cat's battery-electric loader proof of concept trial exceeds expectations. *International Mining*. <https://im-mining.com/2018/11/19/cats-battery-electric-loader-proof-concept-trial-exceeds-expectations/>
- Gouvernement du Canada. (2021, juillet 13). *Le gouvernement investit pour accélérer l'innovation dans le secteur minier du Canada* [Communiqués de presse]. <https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2021/07/le-gouvernement-investit-pour-accelerer-linnovation-dans-le-secteur-minier-du-canada.html>
- Gregory, A., Tharyan, R., & Whittaker, J. (2014). Corporate Social Responsibility and Firm Value : Disaggregating the Effects on Cash Flow, Risk and Growth. *Journal of Business Ethics*, 124(4), 633-657. <https://doi.org/10.1007/s10551-013-1898-5>
- GRI. (2022). *GRI - Mission & history*. <https://www.globalreporting.org/about-gri/mission-history/>
- GRI & SASB. (2021). *A Practical Guide to Sustainability Reporting*. <https://www.globalreporting.org/media/mlkjp1i/gri-sasb-joint-publication-april-2021.pdf>
- Gruenhagen, J. H., & Parker, R. (2020). Factors driving or impeding the diffusion and adoption of innovation in mining : A systematic review of the literature. *Resources Policy*, 65, 101540. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101540>
- GSSB. (2023a). *GRI Sector Standards Project for Mining – Exposure draft*. GRI. https://www.globalreporting.org/media/zilbm3qo/gri_mining_sector_standard_exposure_draft.pdf
- GSSB. (2023b). *GSSB Work Program 2023-2025*. <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/meetings/2023/october/issb/gssb-work-program-2023-2025.pdf>
- Hazrathosseini, A., & Moradi Afrapoli, A. (2023). The advent of digital twins in surface mining : Its time has finally arrived. *Resources Policy*, 80, 103155. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103155>
- Holger, D. (2023, avril 5). WSJ News Exclusive | At Least 10,000 Foreign Companies to Be Hit by EU Sustainability Rules. *Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/articles/at-least-10-000-foreign-companies-to-be-hit-by-eu-sustainability-rules-307a1406>
- Humphreys, D. (2020). Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral*

- Economics*, 33(1-2), 115-125. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00172-9>
- Hyder, Z., Siau, K., & Nah, F. (2019). Artificial Intelligence, Machine Learning, and Autonomous Technologies in Mining Industry: *Journal of Database Management*, 30(2), 67-79. <https://doi.org/10.4018/JDM.2019040104>
- IEA. (2021). *Mineral requirements for clean energy transitions – The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions>
- IIRC. (2021). *INTERNATIONAL <IR> FRAMEWORK*. <https://www.integratedreporting.org/wp-content/uploads/2021/01/InternationalIntegratedReportingFramework.pdf>
- In, S. Y., Rook, D., & Monk, A. (2019). *Integrating Alternative Data (Also Known as ESG Data) in Investment Decision Making* (SSRN Scholarly Paper 3380835). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3380835>
- INMQ. (2019). *PORTRAIT NUMÉRIQUE DE L'INDUSTRIE MINIÈRE AU QUÉBEC*. https://inmq.gouv.qc.ca/medias/files/Publications/inmq_portrait_numerique.pdf
- Institut de la statistique du Québec. (2023). *Principales statistiques des industries de l'extraction minière pour les minerais métalliques et certains minerais non métalliques, Québec – données annuelles*. Institut de la Statistique du Québec. <https://statistique.quebec.ca/fr/document/principales-statistiques-industries-extraction-miniere-minerais-metalliques-et-certains-minerais-non-metalliques-quebec-donnees-annuelles/tableau/principales-statistiques-industries-extraction-miniere-minerais-metalliques-certains-non-metalliques-donnees-annuelles-quebec>
- International Mining. (2023). Enhancing efficiency and ESG performance. *International Mining*.
- Isheyskiy, V., & Sanchidrián, J. A. (2020). Prospects of Applying MWD Technology for Quality Management of Drilling and Blasting Operations at Mining Enterprises. *Minerals*, 10(10), 925. <https://doi.org/10.3390/min10100925>
- ISSB. (2023a). *IFRS S2—Industry-based Guidance on implementing Climate-related Disclosures*. <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/publications/pdf-standards-issb/english/2023/issued/part-b/ifrs-s2-ibg.pdf>
- ISSB. (2022). *IFRS - ISSB describes the concept of sustainability and its articulation with financial value creation, and announces plans to advance work on natural ecosystems and just transition*. <https://www.ifrs.org/news-and-events/news/2022/12/issb-describes-the-concept-of-sustainability/>
- ISSB. (2023b). *IFRS - IFRS Sustainability Standards Navigator*. <https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/>

- Jacobs, W., Hodkiewicz, M. R., & Bräunl, T. (2015). A Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3), 2565-2573. <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2372046>
- Jang, H., & Topal, E. (2020). Transformation of the Australian mining industry and future prospects. *Mining Technology*, 129, 1-15. <https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1786298>
- Javanmardi Kashan, A., Wiewiora, A., & Mohannak, K. (2021). Unpacking organisational culture for innovation in Australian mining industry. *Resources Policy*, 73, 102149. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102149>
- Jenkins, H., & Yakovleva, N. (2006). Corporate social responsibility in the mining industry : Exploring trends in social and environmental disclosure. *Journal of Cleaner Production*, 14(3), 271-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.10.004>
- Johnson, M. (2010). Barriers to innovation adoption : A study of e-markets. *Industrial Management and Data Systems*, 110, 157-174. <https://doi.org/10.1108/02635571011020287>
- Jonsdottir, B., Sigurjonsson, T. O., Johannsdottir, L., & Wendt, S. (2022). Barriers to Using ESG Data for Investment Decisions. *Sustainability*, 14(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su14095157>
- Kansake, B. A., Kaba, F. A., Dumakor-Dupey, N. K., & Arthur, C. K. (2019). The future of mining in Ghana : Are stakeholders prepared for the adoption of autonomous mining systems? *Resources Policy*, 63, 101411. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101411>
- Knights, P., & Yeates, G. (2021). Progress Toward Zero Entry Mining : Automation Enabling Safer, More Efficient Mining. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(3), 32-38. <https://doi.org/10.1109/MIE.2021.3070684>
- Lazarenko, Y., Garafonova, O., Marhasova, V., & Grigashkina, S. (2021). The determinants of strategic innovation-driven competitiveness of mining companies. *E3S Web of Conferences*, 303, 01061. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130301061>
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>
- Leonida, C. (2021). *The Year Mining Went Electric | E & MJ*. <https://www.e-mj.com/features/the-year-mining-went-electric/>
- Lock, I., & Seele, P. (2016). The credibility of CSR (corporate social responsibility) reports in Europe. Evidence from a quantitative content analysis in 11 countries. *Journal of Cleaner Production*, 122, 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.060>
- Lodh, A. (2020). *ESG and the cost of capital*. MSCI. <https://www.msci.com/www/blog->

posts/esg-and-the-cost-of-capital/01726513589

- Loeb, J., & Thornton, D. (2014). *A Cost Benefit Analysis to Explore the Optimal Number of Blast Movement Monitoring Locations*.
- Madore, L. (2022). *L'investissement minier au Québec en 2021* (Mines en chiffres). Institut de la Statistique du Québec. <https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/mines-en-chiffres-investissement-minier-quebec-2021.pdf>
- Madore, L. (2023). *L'investissement minier au Québec en 2022*. Institut de la Statistique du Québec. <https://statistique.quebec.ca/fr/produit/publication/investissement-minier-quebec-2022>
- Mancini, L., & Sala, S. (2018). Social impact assessment in the mining sector : Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 57, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>
- Marimon, F., Alonso-Almeida, M. del M., Rodríguez, M. del P., & Cortez Alejandro, K. A. (2012). The worldwide diffusion of the global reporting initiative : What is the point? *Journal of Cleaner Production*, 33, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.017>
- Mehrzad Salem. (2007). *Certaines régions sont-elles plus sensibles aux cycles économiques? Différences structurelles entre les économies provinciales et territoriales*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/13-605-x/2003001/chrono/2003prov/4151909-fra.htm>
- Mignon, D., & Sarant, J.-R. (2016). La Responsabilité sociale des entreprises. *Regards croisés sur l'économie*, 19(2), 173-177. <https://doi.org/10.3917/rce.019.0173>
- Mines Canada. (2019). *Le Plan canadien pour les minéraux et les métaux*.
- Mining Engineering. (2020, décembre 1). Battery-electric vehicles taking hold; Emission-free vehicles offer an array of benefits. *Mining Engineering, Volume 72; Issue 12; ISSN:00265187*, 30,32-33.
- Mining.com. (2018). The benefits and pitfalls of mining automation. *MINING.COM*. <https://www.mining.com/web/benefits-pitfalls-mining-automation/>
- Mohnen, P., & Röller, L.-H. (2003). Complementarities in Innovation Policy. *European Economic Review*, 49, 1431-1450. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2003.12.003>
- Moreau, K., Laamanen, C., Bose, R., Shang, H., & Scott, J. (2020). Life cycle assessment to demonstrate how automation improves the sustainability performance of an underground mining operation. *Journal of Sustainable Mining*, 19. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1016>
- Morton, J. (2022). Industry 4.0 Solutions for Drilling Deliver. *Engineering and mining journal*. <https://www.e-mj.com/features/industry-4-0-solutions-for-drilling-deliver/>

- MRNF. (2020). *Processus de développement minéral*. <https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/processus-developpement-mineral.pdf>
- MRNF. (2023a). *Mines actives et en maintenance*. <https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/MinesActives.pdf>
- MRNF. (2023b). *Projets miniers au Québec*. <https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/ProjetsMiniers.pdf>
- MRNF. (2023c). *RETOMBÉES ÉCONOMIQUES ET FISCALES DU SECTEUR MINIER QUÉBÉCOIS*. https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/RTB_SecteurMinier_2012-2019.pdf
- MRNF. (2014). *Vision stratégique du développement minier au Québec—Document de présentation*. https://mrnf.gouv.qc.ca/documents/mines/demarche_vision-strategique_KPMG.pdf
- MRNF. (2023d). *Le processus de développement minéral – Géologie Québec*. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/geologie-pour-tous/processus-developpement-mineral/>
- Newbold, T., Hudson, L. N., Arnell, A. P., Contu, S., De Palma, A., Ferrier, S., Hill, S. L. L., Hoskins, A. J., Lysenko, I., Phillips, H. R. P., Burton, V. J., Chng, C. W. T., Emerson, S., Gao, D., Pask-Hale, G., Hutton, J., Jung, M., Sanchez-Ortiz, K., Simmons, B. I., ... Purvis, A. (2016). Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science (New York, N.Y.)*, 353(6296), 288-291. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2201>
- Ng, A. C., & Rezaee, Z. (2015). Business sustainability performance and cost of equity capital. *Journal of Corporate Finance*, 34, 128-149. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2015.08.003>
- Niemoller, J. (2021). *ESG Reporting Frameworks: Comparing CDP, GRI & More*. <http://www.perillon.com/blog/esg-reporting-frameworks>
- Nieto, A., Schatz, R. S., & Dogruoz, C. (2020). Performance analysis of electric and diesel equipment for battery replacement of tethered LHD vehicles in underground mining. *Mining Technology*, 129(1), 22-29. <https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1720371>
- Nuttall, R., & Bernow, S. (2020). *Why ESG scores are here to stay | McKinsey*. McKinsey. <https://www.mckinsey.com/capabilities/strategy-and-corporate-finance/our-insights/why-esg-is-here-to-stay>
- NYU - STERN. (2019). *Sustainability Materiality Matrices Explained*.
- Paredes, D., & Fleming-Muñoz, D. (2021). Automation and robotics in mining : Jobs, income and inequality implications. *The Extractive Industries and Society*, 8(1), 189-193. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.01.004>
- Parreira, J. (2013). *An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage*

- Truck System with a Manually-Operated System* [THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA]. <https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/24/1.0074111/1>
- Pereira Cabral, B., Lage de Sousa, F., & Canêdo-Pinheiro, M. (2020). Assessing the impacts of innovation barriers : A qualitative analysis of Brazil's natural resources industry. *Resources Policy*, 68(C). https://econpapers.repec.org/article/eeejrpoli/v_3a68_3ay_3a2020_3ai_3ac_3as0301420718303817.htm
- PwC. (2022). Mine 2022 : A critical transition. PwC. https://www.pwc.com/gx/en/energy-utilities-mining/assets/global_mine_report_2022.pdf
- Québec, I. de la statistique du. (2023). *Compte des émissions de gaz à effet de serre (GES) par secteur, Québec, 2009-2020*. Institut de la statistique du Québec. <https://statistique.quebec.ca/fr/produit/tableau/compte-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-ges-par-secteur-quebec>
- Raponi, T. R., Hooshier, A., Aarsen, J., Beauregard, A.-J., Gaudreault, D., Rachidi, M., Duplessis, C., & Lévesque Michaud, M. (2021). *Val-d'Or East Project NI 43-101 Technical Report & Preliminary Economic Assessment*. Ausenco Engineering Canada. [https://minedocs.com/21/Val-d'Or_East_\(VDE\)-PEA-09072021.pdf](https://minedocs.com/21/Val-d'Or_East_(VDE)-PEA-09072021.pdf)
- Rehan Wasti & Lucy Casacia. (2020). *Adoption tactique des technologies dans le secteur minier*. WSPglobal. <https://www.wsp.com/fr-ca/insights/adoption-tactique-des-technologies-dans-le-secteur-minier>
- Resource World. (2022). *Artificial intelligence to benefit the mining industry – Resource World Magazine*. <https://resourceworld.com/artificial-intelligence-to-benefit-the-mining-industry/>
- Reverte, C. (2012). The Impact of Better Corporate Social Responsibility Disclosure on the Cost of Equity Capital. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 19(5), 253-272. <https://doi.org/10.1002/csr.273>
- Rio Tinto. (2018). *Iron Ore –Delivering value from flexibility and optionality · Chris Salisbury. Iron Ore –Delivering value from flexibility and optionality. Iron Ore chief executive*. Dokumen.Tips. <https://dokumen.tips/documents/iron-ore-delivering-value-from-flexibility-and-optionality-chris-salisbury.html>
- Samis, M., & Steen, J. (2020). Financial evaluation of mining innovation pilot projects and the value of information. *Resources Policy*, 69, 101848. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101848>
- Sánchez, F., & Hartlieb, P. (2020a). Innovation in the Mining Industry : Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(5), 1385-1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
- Sánchez, F., & Hartlieb, P. (2020b). Innovation in the Mining Industry : Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining*,

Metallurgy & Exploration, 37(5), 1385-1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>

Sandvik Mining and Rock Solutions (Réalisateur). (2018, octobre 5). *For The Long Haul | Sandvik Mining and Rock Technology*. <https://www.youtube.com/watch?v=SbJwFySi9HU>

Sandvik Mining and Rock Solutions (Réalisateur). (2021, août 16). *In the Zone*. <https://www.youtube.com/watch?v=ObMQCYs80cl>

SASB. (2018). *Métaux et exploitation minière—Normes de comptabilisation du développement durable*.

SASB. (2020). *GUIDE PRATIQUE DE MISE EN ŒUVRE*. <https://www.sasb.org/wp-content/uploads/2020/12/ImplementationPrimer-Final-French.pdf>

Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>

Statistique Canada. (2023a). *Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise*. https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV_f.pl?Function=getSurvey&Id=1499788

Statistique Canada. (2023b). *Tableau 27-10-0149-01 Innovations de produits ou de procédés avec des avantages environnementaux, selon l'industrie et la taille de l'entreprise*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=2710014901>

Statistique Canada. (2023c). *Tableau 33-10-0182-01 Innovations de procédés qui ont engendré des économies de coûts en lien avec les produits, selon l'industrie et la taille de l'entreprise*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3310018201>

Statistique Canada. (2023d). *Tableau 36-10-0402-01 Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, par industries, provinces et territoires (x 1 000 000)*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3610040201>

Steen, J., Macaulay, S., Kunz, N., & Jackson, J. (2018a). Understanding the Innovation Ecosystem in Mining and What the Digital Revolution Means for It. In M. J. Clifford, R. K. Perrons, S. H. Ali, & T. A. Grice (Éds.), *Extracting Innovations* (1^{re} éd., p. 3-26). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22353-1>

Steen, J., Macaulay, S., Kunz, N., & Jackson, J. (2018b). *Understanding the Innovation Ecosystem in Mining and what the Digital Revolution means for It* (p. 3-26). <https://doi.org/10.1201/b22353-1>

Stewart, J. M., & Malatji, S. M. (2018). Development of the MOSH Leading Practice Adoption System—A science-based system for managing behaviour change. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118, 259-277. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n3a9>

Surroca, J., Tribó, J. A., & Waddock, S. (2010). Corporate responsibility and financial

performance : The role of intangible resources. *Strategic Management Journal*, 31(5), 463-490. <https://doi.org/10.1002/smj.820>

SystExt. (2023). *Controverses minières—Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales* (2).

Tahmasebi, S. (2018). *Ventilation and Cooling Comparison between Diesel and Electric Mining Equipment*.

TCFD. (2021). *Implementing the Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*.

UNDP. (2016). *Cartographie de l'exploitation minière en fonction des objectifs de développement durable : Un atlas*. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_FR.pdf

Valacchi, G., Raffo, J. D., Daly, A., & Humphreys, D. A. (2019). *Innovation in the Mining Sector and Cycles in Commodity Prices* (SSRN Scholarly Paper 4424297). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4424297>

Valenta, R. K., Kemp, D., Owen, J. R., Corder, G. D., & Lèbre, É. (2019). Re-thinking complex orebodies : Consequences for the future world supply of copper. *Journal of Cleaner Production*, 220, 816-826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.146>

Vivek Salgaocar. (2022, novembre 2). Why innovation in the mining sector is critical for the energy transition. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2022/11/why-innovation-in-the-mining-sector-is-critical-for-the-energy-transition/>

White & Case LLP. (2022). *Mining & metals 2022 : ESG and energy transition – the sector's biggest opportunity*. <https://www.whitecase.com/insight-our-thinking/mining-metals-2022-esg-and-energy-transition-sectors-biggest-opportunity>

World Economic Forum. (2019). *ESG Ecosystem Map*. <https://widgets.weforum.org/esgecosystemmap/index.html#/>