

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Bryan BOUDREAU-TRUDEL

IMPACT ET FACTEURS CLÉS DE L'INTRODUCTION D'ÉQUIPEMENTS MINIERS
INNOVANTS: LE CAS D'UNE MINE SOUTERRAINE

MONTRÉAL, LE 25 SEPTEMBRE 2014

©Tous droits réservés, Bryan BOUDREAU-TRUDEL, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Kazimierz Zaras, codirecteur de thèse
Département des sciences de la gestion à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

M. Daniel Forgues, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, membre du jury
Département génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Bruno Urli, examinateur externe
Département des sciences de la gestion à l'Université du Québec à Rimouski

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 AOÛT 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Étant natif de l'Abitibi-Témiscamingue, le sujet des mines était un incontournable. Quelques conversations avec des gens du terrain ont tôt soulevé les difficultés d'intégration des nouvelles technologies en équipement. À cela s'ajoute ma passion pour les chiffres et mon expérience des aides à la décision. Un mélange de tous ces ingrédients forma rapidement un terrain propice et fertile à des études doctorales. Le reste appartient maintenant à l'histoire...

La thèse par articles a été privilégiée. Une meilleure diffusion des résultats a motivé ce choix bien personnel. Les articles (publiés, acceptés ou soumis) composent le corps de la thèse. Ceux-ci sont présentés sous forme de chapitres distincts, mais cohérents, ce qui permet d'aiguiller la lecture en toute continuité et fluidité.

Les articles ont été publiés dans des revues scientifiques de langue anglaise, à l'exception de celui présentant les résultats finaux. Pour ce dernier, nous avons favorisé une publication dans une revue québécoise de langue française. Nous croyons que ce choix de publication provinciale ne peut que permettre une meilleure diffusion de nos résultats dans l'industrie minière québécoise à qui ces travaux sont destinés. Nous souhaitons soutenir cette industrie à demeurer parmi l'élite mondiale.

Notons également que les résultats de cette thèse ont fait l'objet de maintes publications. Outre que par le truchement d'articles de revues avec comité de lecture, la diffusion des résultats a été accentuée par diverses conférences nationales et internationales avec comité de pairs, des conférences sans comité de lecture et une présentation scientifique par affiche. Pour couronner le tout, les résultats ont également été dévoilés lors d'un colloque de l'industrie, et ce, à titre de conférencier invité.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse fût grandement facilitée par l'apport de personnes fantastiques qui ont su me guider tout au long du processus. Merci à ma directrice, Madame Sylvie Nadeau, qui, grâce à sa rigueur et son professionnalisme, m'a prodigué de multiples et précieux conseils. Une grande part de cet aboutissement vous revient! Au-delà de cette formation académique, vous m'avez permis d'enrichir grandement mon coffre à outils en vue de ma carrière professionnelle.

Un merci également spécial à mon codirecteur, Monsieur Kazimierz Zaras. La vie met sur notre route des personnes exceptionnelles qui sont un réel plaisir à cotoyer. Monsieur Zaras, vous faites partie de ces gens! Vous avez profondément embelli et facilité plusieurs de mes journées. Merci pour votre très grande disponibilité, vos judicieux et généreux conseils et pour tout le reste... Si je suis engagé en statistique et en aide à la décision aujourd'hui, c'est grâce à vous!

J'adresse mes sincères remerciements à Madame Isabelle Deschamps, ainsi qu'aux membres du jury : M. Daniel Forgues (ÉTS), M. Christian Belleau (ÉTS) et M. Bruno Urli (UQAR) en tant qu'examinateur externe.

Je me dois également de souligner l'appui financier de plusieurs organismes, sous forme de bourses au mérite et de subventions. À cet égard, je souhaite remercier le Fonds de recherche du Québec — Nature et technologies (FRQNT), l'ÉTS, l'Association des professeurs de l'ÉTS, l'UQAT, le Syndicat des chargés de cours de l'UQAT et la Fondation de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST).

Les travaux de cette thèse n'auraient pu se concrétiser sans l'aide inestimable de plusieurs personnes à l'emploi de la mine où l'étude a été réalisée. Des gens pleins de gentillesse et de patience face à mes nombreuses questions se doivent de recevoir mes sincères remerciements.

VIII

Pour conclure, je réserve mes derniers remerciements à ma famille. Tout d'abord, sans le support de mes parents rien de tout cela n'aurait été possible. Depuis le début de mon parcours académique, vous m'avez toujours supporté et encouragé. Si j'ai appris beaucoup à l'école, ce sont toutefois vos leçons de vie qui ont construit mes fondations. Vos multiples démonstrations de courage face à la vie représentent votre plus important héritage. Finalement, je remercie celle qui n'a cessé de m'encourager tout en apportant son aide continue, ma chère épouse, Marie-Josée. Cette dernière année aura été pleine d'émotions et de succès pour notre couple et nous nous devons d'en être tous les deux très fiers.

IMPACT ET FACTEURS CLÉS DE L'INTRODUCTION D'ÉQUIPEMENTS MINIERS INNOVANTS: LE CAS D'UNE MINE SOUTERRAINE

Bryan BOUDREAU-TRUDEL

RÉSUMÉ

Les entreprises minières naviguent dans un environnement économique cyclique influencé par les prix du marché. À cela, s'ajoute une pression sociale accrue au niveau des conditions de travail et de la sécurité des travailleurs. C'est donc à un contexte hautement concurrentiel que les entreprises de ce secteur sont confrontées. Afin de demeurer compétitives, l'une des solutions qu'elles privilégient est l'acquisition d'équipements innovants.

Toutefois, l'introduction d'équipements innovants ne se fait pas sans heurts. Plusieurs études ont en effet démontré que l'arrivée de nouveaux équipements plus gros, plus puissants et plus sophistiqués a également entraîné des effets négatifs. Parmi ceux-ci notons, les périodes d'adaptation plus longues que prévues. Mais encore, ces équipements sont aussi en cause dans bon nombre d'accidents et de décès, et ce, tant à l'échelle internationale que chez les mines québécoises.

Devant ces constats de succès mitigés, il appert fondamental de mieux comprendre les facteurs de succès lors de l'implantation d'équipements miniers innovants. Dans cette thèse nous proposons l'étude approfondie de ce sujet par une étude de cas réalisée dans une mine aurifère souterraine témiscabitibienne. Dans un premier temps, notre démarche vise à mesurer l'impact de dix projets innovants sur des indicateurs de performance en productivité et en santé et sécurité du travail (SST). Dans un deuxième temps, nous proposons l'utilisation d'un outil d'aide à la décision, l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance, afin d'identifier les facteurs clés favorisant l'implantation de ces équipements innovants.

Parmi les résultats obtenus, deux facteurs ont été identifiés comme les plus pertinents sur l'ensemble des indicateurs de performance étudiés, soit le niveau d'habileté requis pour maîtriser la technologie et le niveau d'acceptation de cette dernière par les opérateurs. En plus de ces deux facteurs, la qualité du siège et l'expérience des opérateurs ont également été identifiées comme pertinentes pour expliquer les résultats en SST, alors que le niveau de standardisation du nouvel équipement s'est montré pertinent pour expliquer ceux en productivité.

Nos travaux permettent ainsi à notre partenaire industriel de cibler et de prioriser ses besoins pour que l'implantation d'équipements innovants entraîne dorénavant une amélioration de la performance en productivité et en SST.

Bien que nos résultats proviennent et se limitent à une étude de cas, l'approche innovante et rigoureuse que nous proposons à la communauté scientifique et industrielle peut être mise en

application à chaque entreprise minière souterraine désirant identifier ses propres facteurs de succès inhérents à son propre environnement. D'autres limites et perspectives offrent des pistes de recherches potentielles sur lesquelles se conclue notre thèse. À ce titre, nous proposons des indicateurs de performance supplémentaires, tels que le nombre de tonnes transportées par les camions et le taux de sévérité des blessures. De plus, une étude similaire, mais prenant en considération les accidents touchant les employés d'entrepreneurs miniers, de même que les accidents survenus lors de réparation ou de maintenance, ajouterait des connaissances complémentaires et intéressantes sur le sujet développé dans cette thèse.

Mots-clés : mine, innovation, équipement, productivité, santé et sécurité du travail (SST), analyse multiattribut (*dominance-based rough set approach*).

IMPACT AND KEY FACTORS OF THE INTRODUCTION OF INNOVATIVE MINING EQUIPMENTS: THE CASE OF AN UNDERGROUND MINE

Bryan BOUDREAU-TRUDEL

ABSTRACT

The mining companies navigate in a cyclic economic environment influenced by market prices. Concurrent with this environment are rising expectations of society with regard to working conditions and safety of workers. It is thus a highly competitive environment that companies in this sector are facing. To remain competitive, one of the solutions that they favor is the acquisition of innovative equipments.

However, the introduction of innovative equipments is not made without clashes. Several studies indeed demonstrated that the arrival of bigger, more powerful and more sophisticated equipments also produced negative effects. Among these, let us note the periods of adaptation longer than planned. Furthermore, these equipments are also in cause of numerous accidents and deaths, and it is the case on an international scale as well to mines from Quebec.

In front of these reports of reserved successes, it appears fundamental to better understand the factors of success for the implementation of innovative mining equipments. In this thesis we propose an on depth study of this subject by a case study realized in an underground gold mine on the Abitibi-Témiscamingue territory. At first, our approach aims at measuring the impact of ten innovative projects on performance indicators on productivity and on occupational health and safety (OHS). Secondly, we propose the use of a decision aid tool, the dominance-based rough set approach, to identify the key factors favoring the implementation of these innovative equipments.

Among the obtained results, two factors were identified as the most relevant on all the studied performance indicators, the level of skill required to operate the technology and the level of acceptance of the latter by the operators. In addition to these two factors, the quality of the seat and the experience of the operators were also identified as relevant to explain the results in OHS, while the level of standardization of the new equipment has proved relevant to explain those in productivity.

Our work will help our industrial partner to target and prioritize its needs for that the implantation of innovative equipments causes henceforth an improvement in performance in productivity and in OHS.

Although our results are limited to a case study, the innovative and rigorous approach which we propose to the scientific and industrial community is applicable to every underground mining company wishing to identify its own factors of success inherent to its own environment. Others limits and perspectives offering potential avenues of research end our thesis. As such, we propose additional performance indicators, such as the number of tons

transported by trucks and also the severity of injuries. Furthermore, a similar study, but considering the accidents involving the employees of mining contractors, as well as the accidents arisen during repair or maintenance would add complementary and interesting knowledge on the subject developed in this thesis.

Keywords : mines, innovation, mining equipment, productivity, occupational health and safety (OHS), multiattribute analysis (*dominance-based rough set approach*).

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE	5
1.1 Identification des éléments du problème	5
1.1.1 Productivité dans l'industrie minière	6
1.1.2 SST dans l'industrie minière	8
1.1.2.1 Définitions	8
1.1.2.2 Points saillants.....	10
1.2 Motivation et délimitation du champ d'étude	14
1.2.1 Prédominance de l'industrie minière dans le paysage de l'Abitibi-Témiscamingue	15
1.2.2 Design d'exploitation d'une mine souterraine	20
1.2.3 Innovation dans le domaine minier	23
1.2.3.1 Chaîne de l'innovation industrielle	23
1.2.3.2 Sources d'innovation dans le domaine minier	24
1.2.3.3 Innovation en équipement minier souterrain.....	31
1.2.3.4 Automatisation en équipement minier souterrain	33
1.3 Questions de recherches et ses objectifs	35
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	39
2.1 Fondement méthodologique de la thèse.....	39
2.2 Choix méthodologique.....	41
2.2.1 Démarche d'une étude de cas	42
2.3 Cueillette de données	43
2.3.1 Facteurs contextuels en gestion de l'innovation minière	45
2.3.2 Indicateurs de performance en productivité	45
2.3.3 Indicateur de performance en SST	47
2.4 Modes de traitement des données	48
2.4.1 Tests statistiques.....	49
2.4.2 Approche des ensembles approximatifs	54
2.4.2.1 Étapes de l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance.....	56
2.5 Structure de la thèse	59
CHAPITRE 3 ARTICLE 1: MANAGING EQUIPMENT INNOVATIONS IN MINING: A REVIEW	63
3.1 Introduction.....	64
3.2 Methodology	65
3.3 Results.....	66
3.4 Discussion	73
3.5 Conclusion	75

CHAPITRE 4	ARTICLE 2: INTRODUCTION OF INNOVATIVE EQUIPMENT IN MINING: IMPACT ON PRODUCTIVITY	91
4.1	Introduction.....	92
4.2	Problem.....	93
4.3	Methodology	93
	4.3.1 Equipment introduction projects	94
	4.3.2 Performance indicators.....	96
4.4	Results.....	97
	4.4.1 Unit cost per meter drilled.....	98
	4.4.2 Unit cost per hour of use	99
	4.4.3 Availability (reliability)	101
4.5	Discussion	102
4.6	Conclusion	105
CHAPITRE 5	ARTICLE 3: INTRODUCTION OF INNOVATIVE EQUIPMENT IN MINING: IMPACT ON OHS	107
5.1	Introduction.....	108
5.2	Problem	108
5.3	Methodology	109
	5.3.1 Equipment introduction projects	110
	5.3.2 Performance indicator	112
5.4	Results.....	113
	5.4.1 Bolters (projects 1 and 1.5)	114
	5.4.2 Trucks (project 4)	115
	5.4.3 LHDs (project 7)	116
5.5	Discussion	117
5.6	Conclusion	121
CHAPITRE 6	ARTICLE 4: INTRODUCTION D'ÉQUIPEMENTS MINIERS INNOVANTS: LES FACTEURS CLÉS POUR UNE IMPLANTATION RÉUSSIE	123
6.1	Introduction.....	124
6.2	Méthodologie	125
6.3	Description des projets sous étude	129
6.4	Résultats	131
	6.4.1 Facteurs clés pour l'amélioration de la productivité.....	131
6.5	Facteurs clés pour l'amélioration du taux de fréquence des accidents	134
6.6	Discussion	135
6.7	Conclusion	139
CONCLUSION	.....	141
RECOMMANDATIONS	.....	145
ANNEXE I	HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUÉBÉCOISE	149

ANNEXE II	HISTORIQUE DE LA SST DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUÉBÉCOISE.....	157
ANNEXE III	CAUSES DU DÉCÈS À LA MINE LARONDE DU 2 MARS 2011	171
ANNEXE IV	LITTÉRATURE SUR L'INNOVATION	173
ANNEXE V	ANALYSE MULTIATTRIBUT	179
ANNEXE VI	DÉFINITIONS DES ATTRIBUTS CONDITIONNELS ET DE LEURS ÉCHELONS	191
APPENDICE A	CERTIFICATS D'ÉTHIQUE	193
APPENDICE B	DOCUMENTS: COLLECTE DE DONNÉES	197
APPENDICE C	SHAPIRO-WILK NORMALITY TESTS	207
APPENDICE D	FISHER TESTS FOR THE EQUALITY OF VARIANCES	209
APPENDICE E	LISTE DES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA THÈSE.....	211
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	215

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Causes de lésions dans le secteur de l'extraction de minerais d'or et d'argent au Québec 1999-2008	13
Tableau 1.2 Entreprises et emplois de la filière de production mine en Abitibi-Témiscamingue en 2009	15
Tableau 1.3 Pourcentage des entreprises ayant acquis des machines et équipements ou d'autres technologies liés à l'innovation.....	27
Tableau 1.4 Améliorations technologiques dans les branches minières, manufacturières et manufacturières primaires du secteur de l'extraction minière	28
Tableau 1.5 Type et degré de nouveauté et définition de l'innovation	32
Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector	77
Tableau 3.2 Related literature examining common factors influencing OHS and productivity in the mining sector	86
Tableau 4.1 Summary of the ten equipment-upgrading projects under study	95
Tableau 4.2 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of unit cost per meter drilled	98
Tableau 4.3 T-tests for the effect of innovative equipment on the unit cost per meter drilled	99
Tableau 4.4 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of unit cost per hour of use	100
Tableau 4.5 T-tests for the effect of innovation on mining equipment unit cost per hour of use.....	100
Tableau 4.6 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of availability ratio.....	101
Tableau 4.7 T-tests for the effect of innovation on equipment availability in mining	102

XVIII

Tableau 5.1	Summary of the ten equipment-upgrading projects under study	111
Tableau 5.2	Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of injury rate.....	113
Tableau 5.3	Excerpts from reports of injuries involving bolters	115
Tableau 5.4	Excerpts from reports of injury involving trucks.....	116
Tableau 5.5	Excerpts from the reports of injuries involving LHDs	117
Tableau 6.1	Table de décision	126
Tableau 6.2	Échelles de performance des attributs décisionnels.....	129
Tableau 6.3	Projets sous étude.....	130
Tableau 6.4	Facteurs clés pour l'indicateur \$/m foré	132
Tableau 6.5	Facteurs clés pour l'indicateur \$/h	133
Tableau 6.6	Facteurs clés pour l'indicateur de disponibilité.....	134
Tableau 6.7	Facteurs clés pour l'indicateur du taux de fréquence des accidents	135

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Technologie dans le transport de mineraux 1960-2005 (actualisé en USD 2001)	7
Figure 1.2	Performance en SST dans les mines du Québec 1995-2013.....	12
Figure 1.3	Système du secteur de l'extraction minière.....	17
Figure 1.4	Activités d'une entreprise d'extraction minière.....	17
Figure 1.5	Mines actives au Québec en 2013.....	19
Figure 1.6	Méthodes d'exploitation d'une mine souterraine.....	20
Figure 1.7	Représentation schématique d'une exploitation minière souterraine	22
Figure 1.8	Chaîne d'innovation industrielle	24
Figure 1.9	Pourcentage d'entreprises innovatrices selon le type d'innovation	26
Figure 1.10	Voies d'accès à l'innovation	29
Figure 2.1	Démarche méthodologique de la thèse	41
Figure 2.2	Démarche de réalisation de l'étude de cas	42
Figure 2.3	Outils de collecte de données.....	44
Figure 2.4	Modes de traitement des données	48
Figure 2.5	Étapes du test d'hypothèse	50
Figure 2.6	Structure des chapitres suivants de la thèse	60
Figure 3.1	Summary of contextual factors to consider in the management of mining equipment innovations.....	89
Figure 5.1	Semi-automated bolter VS standard bolter	114

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	Analytic Hierarchy Process
AMQ	Association minière du Québec
APSM	Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier
A-T	Abitibi-Témiscamingue
CAT	Commission des accidents du travail
CCIM	Conseil canadien de l'innovation minière
CEMI	Centre for Excellence in Mining Innovation
CN	Chargeuse-navette
CPS	Current population survey
CRERCT	Commission royale d'enquête sur les rapports entre le capital et le travail
CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail
DCPP	Disease Control Priorities Project
DM	Preneur de décision (<i>decision maker</i>)
DRSA	Dominance-based rough set approach
EABD	Ensembles approximatifs basés sur la dominance
ECET	Enquête sur le commerce électronique et la technologie
ELECTRE	Élimination et choix traduisant la réalité
ÉTS	École de technologie supérieure
FMTM	Formation modulaire du travailleur minier
FTQ	Fédération des travailleurs et travailleuses du Québec
HFACS-MI	Human factors analysis and classification system mining industry
IR	Injury rate

IRSST	Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail
LATMP	Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles
LHD	Load-haul-dump
LIDSS	Laboratory of Intelligent Decision Support Systems
MAUT	Multiattribute Utility Theory
MISA	Mines, Innovation, Solutions et Applications
MMSD	Mining, Minerals and Sustainable Development
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
MSHA	Mine Safety and Health Administration
NFS	Net Flow Score
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OHS	Occupational health and safety
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PROMETHEE...	Preference ranking organization methods for enrichment of evaluations
R&D	Recherche et développement
SCFP	Syndicat canadien de la fonction publique
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
SST	Santé et sécurité du travail
UDMN	Ultra-deep Mining Network
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

INTRODUCTION

Nous sommes actuellement dans une ère d'innovations technologiques accélérées et de convergence de multiples trajectoires technologiques. Cet environnement modifie la façon dont les entreprises doivent être structurées et gérées. Ceci est d'autant plus vrai dans le domaine de la gestion de l'innovation, qui touche tous les aspects et les décisions relatives à l'introduction de nouvelles technologies (Klippel *et al.*, 2008). De plus, certaines entreprises doivent naviguer dans un environnement très instable causé par des cycles économiques tantôt favorables, tantôt défavorables (Blanchette, 2010). Cette situation est particulièrement exigeante pour les entreprises œuvrant dans l'industrie minière où le prix des métaux est vulnérable à l'humeur des marchés boursiers mondiaux, et où la concurrence des pays émergents stimule le besoin de mécanismes pour hausser la productivité (Bartos, 2007).

Au milieu de ces fluctuations exogènes, l'importance de la santé et de la sécurité au travail (SST) s'accentue pour bon nombre d'entreprises minières compte tenu des normes de plus en plus exigeantes et de la pression accrue de la société civile, davantage informée de ses droits et alerte pour le signifier aux divers acteurs sociaux (Groupe de travail sur le permis social, 2010).

Confrontées à ces réalités socio-économiques, bon nombre d'entreprises minières passent à l'action dans l'espoir de demeurer concurrentielles. L'une des solutions privilégiées par ces dernières est l'acquisition de nouvelles technologies en équipement (Bullock, 2000; Planeta et Paraszczak, 2000; Nielsen et Gether, 2004; Upstill et Hall, 2006).

Toutefois, de nombreuses études soulignent les effets négatifs associés à l'introduction d'une nouvelle technologie. Parmi ces effets indésirables, notons le faible niveau d'acceptation de la technologie par les opérateurs (Lynas et Horberry, 2011), la dépendance à la technologie (Lynas et Horberry, 2011), les périodes d'adaptation plus longues que prévues suite à une formation inadéquate (Karmis, 2001; Kecojevic *et al.*, 2007; Ural et Demirkol, 2008; Dhillon, 2010; Patterson et Shappell, 2010; Lynas et Horberry, 2011; Ruff *et al.*, 2011) ou

encore à cause d'un niveau d'habileté insuffisant (Karmis, 2001; Dhillon, 2010; Lynas et Horberry, 2011). De plus, l'équipement minier est en cause dans une forte proportion d'accidents et de décès survenus depuis le tournant du nouveau millénaire, et ce, tant au niveau international que chez les mines québécoises.

Face à ces constats de succès mitigés, la gestion de l'introduction des équipements miniers innovants devient fondamentale. Cette thèse vise l'enrichissement des connaissances à ce sujet. Le premier objectif de cette thèse est une meilleure connaissance de l'impact de l'introduction d'équipements miniers innovants sur la performance en productivité de même qu'en SST. Pour obtenir cette meilleure connaissance, nous proposons l'utilisation d'indicateurs de performance objectifs et reconnus dans le domaine minier (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a,b). Le deuxième objectif est d'identifier les facteurs clés favorisant l'implantation de ces équipements innovants. Afin d'identifier ces facteurs de succès, nous proposons une démarche originale, basée sur une étude de cas et utilisant un outil d'aide à la décision, l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance (*dominance-based rough set approach*) (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014d).

Les travaux de cette thèse ont ainsi permis à notre partenaire industriel de cibler et de prioriser ses besoins en ce qui concerne l'implantation d'équipements innovants dans le but de générer une amélioration de la performance en productivité et en SST. Près de vingt facteurs pouvant avoir une influence avaient été identifiés dans la littérature (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014c), mais les plus pertinents pour l'entreprise participante ont pu être ciblés. La démarche utilisée dans cette thèse est potentiellement adaptable et transférable aux autres mines souterraines qui souhaitent identifier leurs propres facteurs de succès.

Les différents résultats de recherche de cette thèse ont été diffusés dans quatre articles de revue avec comité de lecture: deux articles publiés (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a,b), un accepté (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014c) et un soumis (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014d). De plus, nos résultats ont fait l'objet de six conférences nationales et internationales, une conférence à titre de conférencier-invité et une activité de vulgarisation scientifique

(appendice E). La section 2.5 (chapitre 2) présentera la structure de la thèse en synthétisant les différents chapitres de résultats provenant des articles publiés, acceptés ou soumis. Suivant ces résultats, nous dresserons un bilan des travaux et des pistes de recherche potentielles sous forme de conclusion et de recommandations. Finalement, les annexes (I à VI) et appendices (A à E) apporteront des informations complémentaires visant une meilleure compréhension des notions utilisées et de la démarche suivie dans le cadre de la thèse.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

Ce chapitre présente la problématique de recherche et met en lumière les bases et visées de notre projet de recherche. L'identification des éléments du problème permettra tout d'abord de bien définir les éléments centraux de la problématique sous étude (section 1.1). Cette étape exposera l'incertitude de succès suivant l'implantation d'équipements miniers innovants, et ce, tant en termes de productivité (section 1.1.1) que de santé et sécurité au travail (section 1.1.2). Dans un deuxième temps (section 1.2), nous motiverons et délimiterons notre champ d'étude afin de bien comprendre la portée de nos travaux. Finalement, nous énoncerons les questions et les objectifs de la thèse (section 1.3).

1.1 Identification des éléments du problème

Les entreprises minières exercent leurs activités dans un domaine très compétitif où leurs revenus sont dépendants de l'humeur du marché. Afin de demeurer compétitives, ces entreprises doivent continuellement demeurer à l'affût des opportunités leur permettant de réduire leurs coûts d'opérations ou encore d'augmenter leur productivité. Parallèlement à cette pression du marché, s'ajoute une pression sociale accrue, de plus en plus exigeante à l'égard des conditions de travail et de la sécurité des travailleurs (Groupe de travail sur le permis social, 2010). Dans un contexte de pénurie de main-d'oeuvre (Blanchette, 2010), ces considérations en SST deviennent très importantes au niveau de l'attrait et de la rétention de cette main-d'oeuvre.

Confrontées à ces défis économiques et sociaux, l'une des solutions privilégiées par les entreprises minières est l'introduction d'équipements innovants (Bullock, 2000; Planeta et Parasyczak, 2000; Nielsen et Gether, 2004; Upstill et Hall, 2006). En optant pour cette avenue, les entreprises sont motivées par l'attrait de l'un ou plusieurs des gains potentiels suivants:

- augmentation de la capacité de production;
- diminution des coûts d'opérations;
- augmentation de la fiabilité;
- amélioration de l'environnement de travail;
- élimination de facteurs de risques (ex. vibrations, bruits, expositions).

Malheureusement, l'objectif visé n'est pas toujours atteint, et ce, pour diverses raisons qui seront présentées dans les deux prochaines sections (1.1.1 et 1.1.2). Ces sections témoigneront de l'impact de l'introduction d'équipements innovants sur la performance en productivité ainsi qu'en SST dans le domaine minier. Le lecteur est également invité à consulter l'annexe I qui présente un survol de l'historique de l'industrie minière au Québec en mettant l'accent sur les faits marquants et les développements technologiques qu'a connus cette industrie au fil du temps.

1.1.1 Productivité dans l'industrie minière

Avec le temps, les engins miniers sont devenus de plus en plus gros et il est maintenant établi qu'une grande partie de l'augmentation de la productivité au cours des 50 dernières années peut être attribuée aux économies d'échelle associées à cette augmentation de capacités de chargement et de transport. À la Figure 1.1, on voit qu'en 1960, les camions avaient une capacité de 35 tonnes, pour un prix de transport de près de 0.90USD par tonne (en dollars de 2001), alors qu'en 2000, avec des camions d'une capacité de 380 tonnes, le prix de transport a chuté à 0.23USD par tonne (Rendu *et al.*, 2006). Dans les faits, la capacité de chargement s'est améliorée de plus de 1000 % alors que les prix unitaires ont diminué de 72 %.

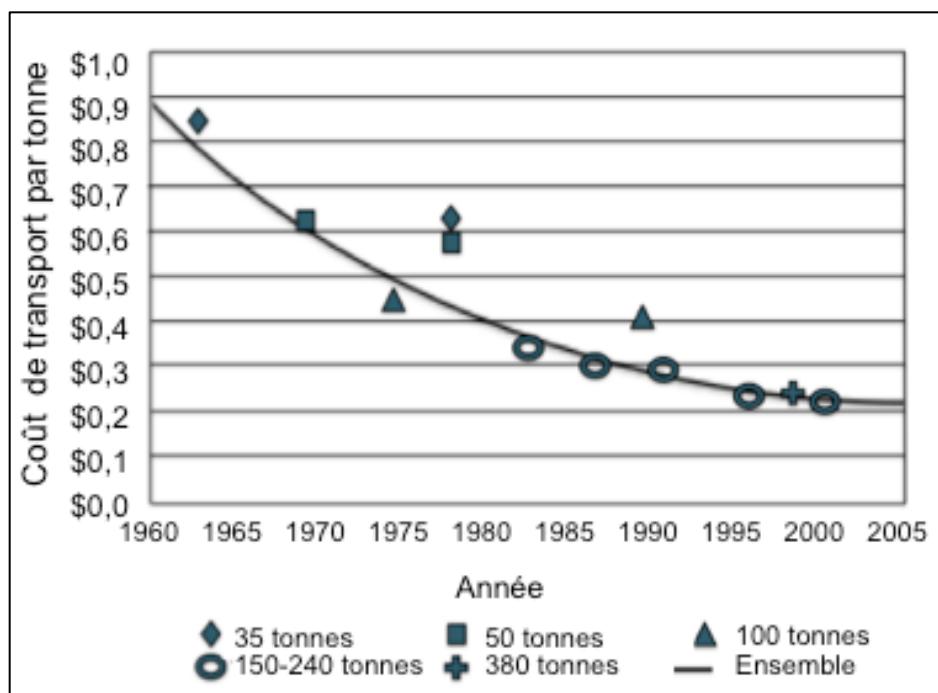


Figure 1.1 Technologie dans le transport de mineraux 1960-2005
 (actualisé en USD 2001)
 Adaptée de Rendu *et al.* (2006)

Toutefois, l'arrivée de ce nouvel équipement, plus gros et plus puissant n'a pas qu'apporté des bénéfices. En effet, comme le soulève *Centre for Excellence in Mining Innovation* (CEMI), la performance journalière, en termes de nombre de mètres d'avancement par jour, a connu un déclin avec l'arrivée de nouvelles technologies associées à l'équipement électro-hydraulique, de même qu'avec l'automatisation (CEMI, 2013). Toujours selon cette source, l'objectif d'avancement était de 15 m/jour en 1980 en Ontario, alors que la moyenne de l'industrie était de 7,2 m/jour en 2001 et de seulement 3,8 m/jour en 2011 (CEMI, 2013).

Les équipements munis d'avancées technologiques offrent souvent plus d'options et de caractéristiques et par conséquent plus de contrôles et de commandes devant être appris et maîtrisés par l'opérateur (Dhillon, 2009). Les périodes d'adaptation peuvent donc être plus longues que prévues à cause d'un niveau d'habileté insuffisant (Karmis, 2001; Dhillon, 2010; Lynas et Horberry, 2011). Afin que leur utilisation soit économique, efficace et sans risques, ces nouveaux équipements nécessitent donc un niveau d'habileté élevé (Dhillon, 2010).

L'arrivée de ces technologies peut donc entraîner des coûts supplémentaires, tant en formation de main-d'œuvre qu'en période d'interprétation, de structuration, de normalisation et de régulation ergonomiques du système homme-technologie. Par ailleurs, la formation inadéquate des opérateurs apparaît sur la liste des facteurs problématiques de plusieurs études (Karmis, 2001; Dhillon, 2010; Lynas et Horberry, 2011; Ruff *et al.*, 2011). Plus l'équipement est spécialisé et qu'il présente de nouvelles fonctions, plus la mise en œuvre peut être longue et coûteuse. Un faible niveau d'acceptation du nouvel équipement par les opérateurs peut également empêcher ou ralentir les gains escomptés, tout comme c'est le cas lorsque les opérateurs deviennent dépendants de la technologie (Lynas et Horberry, 2011). En conséquence, l'introduction d'un nouvel équipement n'est pas nécessairement synonyme de gains, et ce, même sur le long terme. Toutefois, l'objectif d'une telle introduction peut être tout autre que simplement financier; elle peut également viser l'amélioration de la SST. De plus, ces deux objectifs ne sont pas exclusifs l'un et l'autre.

1.1.2 SST dans l'industrie minière

Dans un premier temps, cette section présentera quelques définitions essentielles au domaine de la SST qui nous seront utiles pour la suite de la thèse. Dans un deuxième temps, nous présenterons la performance et certains points saillants de la SST spécifiques au domaine minier au cours des 20 dernières années. Le lecteur qui souhaite en connaître davantage est invité à consulter l'annexe II qui retrace l'histoire de la SST de l'industrie minière québécoise.

1.1.2.1 Définitions

Afin de déterminer si un événement qui a causé une blessure à un travailleur est un accident du travail, il faut se référer à la définition fournie par la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP).

Selon cette loi, un ***accident du travail*** est un événement imprévu et soudain, attribuable à toute cause, survenant à une personne par le fait ou à l'occasion de son travail et qui entraîne

pour elle une lésion professionnelle. La *lésion professionnelle* est définie, selon cette même loi, comme étant une blessure ou une maladie qui survient par le fait ou à l'occasion d'un accident du travail, ou une maladie professionnelle¹, y compris la récidive, la rechute ou l'aggravation.

Spécifions qu'un accident peut résulter de gestes exécutés en accomplissant un travail, comme un effort soutenu et inhabituel ou même un geste qui pourrait être répréhensible (à moins qu'il s'agisse d'une négligence pure et volontaire de la part du travailleur) (Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST), 2011).

Lorsque la loi mentionne que l'évènement peut se produire *par le fait du travail*, celui-ci est alors relié directement aux activités pour lesquelles le travailleur est embauché et il survient alors qu'il s'affaire à ses tâches. Tandis que lorsqu'il est question qu'un évènement puisse se produire *à l'occasion du travail*, cela veut dire que le travailleur n'est peut-être pas en train de réaliser le travail qu'il exécute habituellement, mais les activités qu'il exerce sont connexes à ce travail.

Selon la CSST, le critère primordial afin de déterminer s'il y a accident au travail est le lien d'autorité entre l'employeur et le travailleur:

C'est le lien d'autorité qui unit l'employeur et le travailleur qui est alors le critère déterminant : le travailleur doit, au moment de l'accident, se trouver sous le contrôle, la subordination ou la surveillance de l'employeur. Les circonstances de l'accident, le lieu et le moment où il survient sont également des critères qui sont considérés. Enfin, pour qu'il y ait accident du travail, l'évènement doit avoir entraîné une lésion professionnelle, c'est-à-dire une blessure ou une maladie. Il doit y avoir une relation de cause à effet et non seulement une coïncidence entre l'accident et la lésion. (CSST, 2011)

¹ Pour connaître la liste des maladies professionnelles reconnues par la loi, le lecteur est invité à consulter l'Annexe 1 de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles.

1.1.2.2 Points saillants

L'environnement actuel du XXI^e siècle force les entreprises à faire des choix difficiles; d'une part, la pression de la concurrence et la quête d'amélioration continue des résultats, d'autre part, les évolutions radicales de la société obligent les gestionnaires et les collaborateurs à porter un jugement critique et précautionneux sur les outils économiques qui doivent intégrer une dimension de sécurité, de bien-être et de respect de chacun (Charles et Baddache, 2006). Tout ceci dans une optique de plus en plus présente d'un développement durable de la société. Voici une citation de ces auteurs qui démontre bien l'évolution de société précédemment proposée:

Au XIX^e siècle, on tolérait le travail d'enfants de cinq ans dans les mines; aujourd'hui, c'est impensable. Il y a encore quelques décennies, on trouvait certes regrettable qu'un collaborateur puisse être accidenté ou contracter une maladie professionnelle dans l'exercice de son travail, mais on considérait néanmoins que cela faisait malheureusement partie des « risques du métier ». Aujourd'hui, c'est tout simplement inadmissible. Le curseur a bougé. Il est désormais évident, pour le plus grand nombre, que l'on ne va pas au travail pour perdre sa vie, mais tout simplement pour la gagner. (Charles et Baddache, 2006, p. 3)

Depuis le début des années 1990, la CSST, l'industrie et les travailleurs se sont réunis pour créer plusieurs programmes de santé et de sécurité au travail, ainsi que pour réviser la réglementation de façon continue. Un bon exemple de programme mis sur pieds conjointement par ces acteurs est le programme de formation modulaire du travailleur minier (FMTM), établi en 1995. Cette formation obligatoire pour tous les travailleurs miniers en exercice dans les mines souterraines est dispensée sous forme de modules. Les modules 1, 2, 3, 4, 5 et 7 sont obligatoires:

1. Santé et sécurité au travail;
2. Instructions générales;
3. Écaillage secondaire;

4. Travail en hauteur;
5. Consolidation du terrain;
7. Matériel et équipement de sauvetage.

Ainsi, toute personne qui travaille sous terre bénéficie de cette formation. Selon Pierre Thibault, directeur des services techniques à l'Association minière du Québec (AMQ), ce type de programme, notamment celui-ci, a permis de réduire la fréquence des accidents².

Des efforts ont également visé un meilleur contrôle du terrain, afin d'éviter les chutes de roches et les effondrements. Selon M. Thibault, ce type d'accident était très fréquent il y a 20 ans, alors qu'aujourd'hui, il ne représente plus que 5 à 10 %³. Cela est fort probablement dû au fait que plus rien ne se fait sous terre sans avoir au préalable des plans et devis. Ceux-ci sont préparés de concert par des ingénieurs miniers et géologues dans le but d'assurer la solidité du sol avant que des travaux ne soient effectués, précise Donald Noël, coordonnateur de la région Nord-Nord-Ouest pour le Syndicat des métallos à la Fédération des travailleurs et travailleuses du Québec (FTQ)⁴.

Nous pouvons voir, à la Figure 1.2 de la page suivante, que la performance au chapitre de la fréquence des accidents s'est améliorée sur une base continue depuis les vingt dernières années au Québec. Comme l'indique Christian Provencher, président du comité santé et prévention des accidents de l'AMQ, l'analyse des données pour l'ensemble du domaine minier québécois démontre que le taux de fréquence pour les accidents avec indemnité, les accidents avec assignation de travail modifié, ainsi que pour l'ensemble des accidents, a chuté de 76 %, ce qui représente la meilleure performance à vie en sécurité réalisée dans le domaine minier (AMQ, 2010).

² Lavoie, J.-P. 2010. « Sécurité dans les mines : le Québec n'est pas le Chili ». In *Le Soleil : Cyberpresse du 15 octobre 2010*. <<http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/affaires/actualite-economique/201010/14/01-4332587-securite-dans-les-mines-le-quebec-nest-pas-le-chili.php>>. Consulté le 23 mars 2011.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

En 1995, il y a eu 12,8 accidents par 200 000 heures travaillées (ce qui équivaut au travail de 100 travailleurs sur une année), alors qu'en 2013, ce nombre était de 3,7. Même, si nous regardons plus loin, cette amélioration date de plus de 20 ans, car en 1987, ce taux s'élevait à 21,1 accidents toujours sur la base de 200 000 heures travaillées (Lessard, 2009). Malgré cette amélioration considérable, la Figure 1.2 soulève le fait que la gravité des accidents (nombre moyen de jours perdus par accident) s'est accentuée au cours de la période 1995 à 2013, passant de 29,6 jours à 44,3 jours.

Même si le taux de fréquence des accidents s'est amélioré, le domaine minier génère encore beaucoup trop d'accidents. À ce titre, l'Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier (APSM) soutient qu'en moyenne, un travailleur sur 19 a subi, en 2009, un accident avec perte de temps (APSM, 2010).

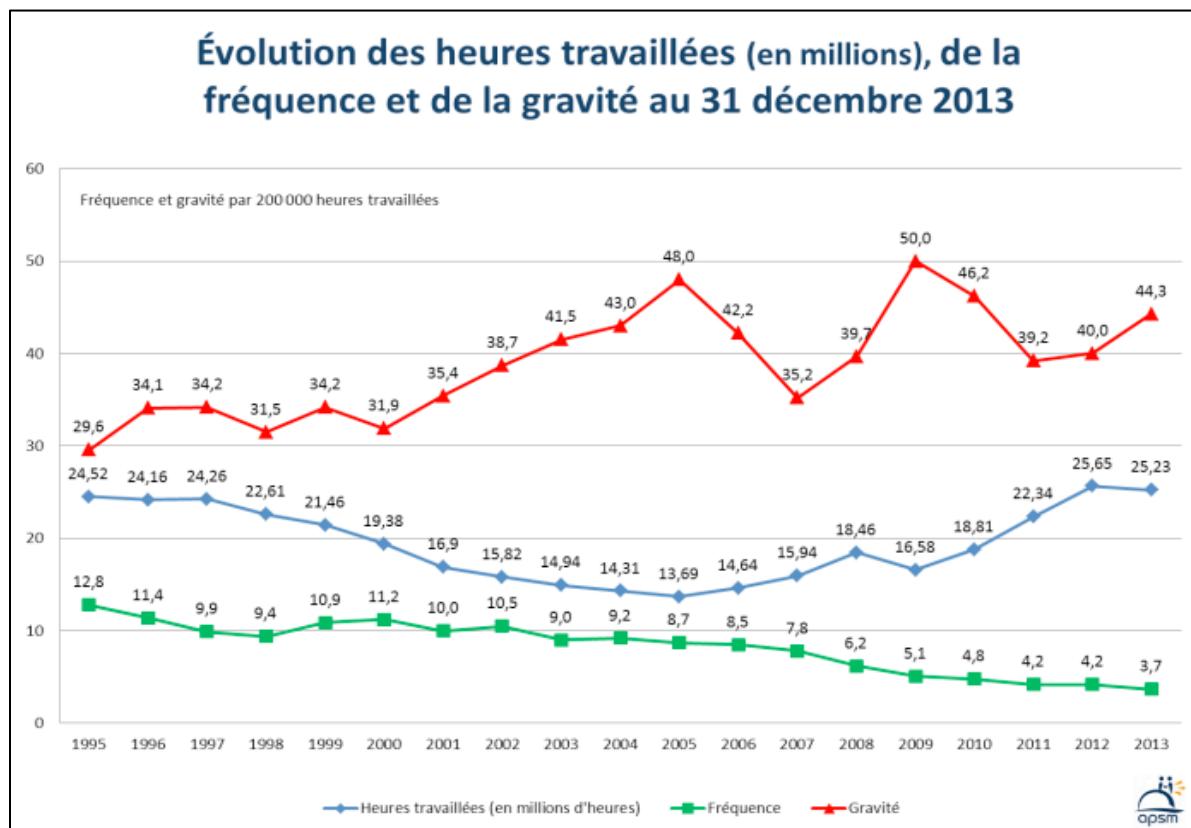


Figure 1.2 Performance en SST dans les mines du Québec 1995-2013
Tirée de l'APSM (2014)

Pour expliquer le nombre élevé d'accidents et de maladies professionnelles de ce secteur, plusieurs études pointent du doigt la manœuvre d'équipements miniers lourds. Ces études démontrent que ce type d'équipement est associé à de multiples facteurs de risque comme la visibilité réduite, le bruit et la vibration (Eger *et al.*, 2004; Kumar, 2004; Dragt *et al.*, 2005; Eger *et al.*, 2006; Coleman et Kerkering, 2007; Smets *et al.*, 2010; Ouellet *et al.*, 2011). L'étude de Ural et Demirkol (2008) est particulièrement éloquente à ce sujet. Dans cette étude on y démontre que les principaux types d'accidents/incidents aux États-Unis et en Nouvelle-Zélande dans les mines au début du 21e siècle sont ceux reliés à la machinerie (respectivement 34 % et 18 %) et au transport (respectivement 29 % et 36 %). Selon l'étude de Kecojevic *et al.* (2007), plus de 75 % des causes de décès liés à l'équipement minier aux États-Unis pour la période 1995-2005, se rapportent à quatre sous-catégories d'équipement : les faits divers (36,6 %), les camions de transport (22,3 %), les convoyeurs à bande (9,3 %) et les chargeurs-transporteurs (8,5 %). Ces énoncés concordent avec l'étude de Smets *et al.*, (2010) qui affirme que parmi tous les accidents de l'industrie minière ontarienne, 16 % des blessures sont le résultat de la manœuvre d'un camion de transport. Le Québec ne fait pas exception comme le démontrent les chiffres du Tableau 1.1. En effet, l'équipement minier est en cause dans près de 20 % des lésions rapportées au cours de la période 1999-2008 au Québec.

Tableau 1.1 Causes de lésions dans le secteur de l'extraction de minerais d'or et d'argent au Québec 1999-2008
Adapté de CSST (2011)

Machines d'extraction minière	13,3 %
Véhicules motorisés/mécaniques	4,1 %
Pièces de machinerie/véhicules	2,3 %
Total équipement	19,7 %
Autres	17,9 %

En plus des lésions, l'équipement minier est également en causes dans les décès les plus récents survenus dans ce secteur. À ce titre, soulignons l'accident mortel du 2 mars 2011 à la

mine LaRonde de Cadillac. Un travailleur y a perdu la vie lorsqu'il a été écrasé par une chargeuse-navette (CN). Selon le rapport de la CSST, plusieurs facteurs sont entrés en jeu dans ce drame, dont le fait que le conducteur de l'engin n'a pas pu voir la victime puisque ce dernier était dans son angle mort, alors que la victime n'a pas pu entendre le véhicule à cause du bruit ambiant trop élevé (voir annexe III). La visibilité restreinte et le bruit sont donc en causes, ce qui rejoint les nombreuses recherches pointant du doigt ces éléments de risque associés à l'équipement minier souterrain (Eger *et al.*, 2004; Eger *et al.*, 2006; Dragt *et al.*, 2005; Ouellet *et al.*, 2011).

Malgré les améliorations en SST des dernières années, les résultats de recherche soulevés dans cette section démontrent clairement un besoin au niveau de l'amélioration de la santé et de la sécurité de l'équipement minier. De plus, cette section nous a permis de mettre en évidence l'incertitude de succès entourant l'arrivée d'équipements miniers innovants, et ce, tant au niveau de la productivité que de la SST. Cette observation démontre l'importance de la gestion de l'innovation lors de l'introduction de nouveaux équipements. Il serait donc intéressant pour ces entreprises de pouvoir identifier les facteurs qui ont un effet de levier sur la performance en productivité et en SST lors d'une telle introduction.

1.2 Motivation et délimitation du champ d'étude

Cette section présentera la motivation derrière le choix du champ d'étude ainsi que les limites de celui-ci. Nous verrons que les mines dans le portrait québécois sont principalement concentrées dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (A-T) et que celles-ci sont en forte proportion des mines aurifères souterraines. Suivant ces explications, nous expliquerons brièvement le processus d'exploitation d'une mine souterraine. Finalement, il sera question de l'innovation dans le domaine minier. Le tout vise à: 1- justifier le choix du domaine minier aurifère souterrain de l'A-T; 2- définir ce que nous considérons comme une innovation dans le cadre de la présente thèse.

1.2.1 Prédominance de l'industrie minière dans le paysage de l'Abitibi-Témiscamingue

L'apport de l'industrie minière dans l'économie de la région de l'Abitibi-Témiscamingue est impressionnant. Ceci vient du fait que la filière de production entière y est présente par une intégration verticale de ses activités. En effet, la chaîne de production est complète, de l'exploration, à l'exploitation, à la concentration du minerai, à sa première transformation, en passant par les multiples laboratoires d'analyses, aux entreprises de services miniers, sans oublier les activités de recherche. Bref, on ne s'étonne pas de constater que la filière de production mine emploie 9 850 personnes en 2009 tel que le démontre le Tableau 1.2 ci-dessous qui est adapté de l'étude de Blanchette (2010).

Tableau 1.2 Entreprises et emplois de la filière de production mine en Abitibi-Témiscamingue en 2009
 Adapté de Blanchette (2010, p. 1)

Activités	SCIAN¹	Entreprises	Emplois
Extraction minière	212	27	2 700
Activités de soutien	213	56	2 950
Première transformation	331	1	650
Fabrication de produits métalliques	332	45	800
Fabrication de machine	333	21	350
Commerce de gros (mine)	416-417	118	1 000
Génie et services conseils (mine)	5413	79	1 400
Total		347	9 850

¹Système de classification des industries de l'Amérique du Nord

Selon l'Institut de la statistique du Québec (2011), il y avait 65 800 travailleurs dans la région au cours de cette même période. La filière mine embauche ainsi tout près de 15 % de

la main-d'œuvre totale de la région, soit plus d'un travailleur sur sept. Pour l'ensemble des travailleurs, on parle d'une masse salariale annuelle directe avoisinant les 223 M\$⁵, pour des salaires moyens parmi les plus élevés de la province. Par ricochet, ces revenus influencent la consommation régionale, et ce, de façon considérable. En effet, nous pouvons parler d'effets multiplicateurs, tant au niveau des emplois indirects (transport, fournitures, sous-traitance et services aux entreprises) qu'au niveau des emplois induits découlant des dépenses des travailleurs dans les commerces et les services régionaux. Tout ceci sans oublier que la présence des entreprises minières est favorable au développement d'infrastructures municipales, commerciales et de services publics (éducation, santé et services sociaux). L'économiste Luc Blanchette estime, dans son étude de 2010, que le multiplicateur pour chaque emploi direct créé serait de 0,5 autre emploi indirect et de 0,1 emploi induit. Pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue, cela représente 3 140 emplois directs, 1 570 emplois indirects et près de 315 emplois induits.

Il y a donc une multitude d'échanges entre tous les acteurs de l'industrie minière. En fait, tel que présenté dans la Figure 1.3 de la page suivante, cette industrie est un système interactif composé de six principaux groupes d'acteurs qui coexistent dans un contexte macroéconomique, social et culturel. Parmi tous ces acteurs, celui qui sera à l'étude dans cette thèse, est le groupe d'entreprises représentant l'extraction de minéraux métalliques. Les flèches de cette Figure 1.3 indiquent qu'entre chaque groupe d'acteurs, il y a une série de facteurs qui influent sur l'échange de connaissances scientifiques et techniques.

Les entreprises d'extraction minière sont elles aussi, représentées par plusieurs activités. Bien qu'il puisse y avoir des variantes à l'occasion, trois principales activités sont réalisées par ces entreprises. Ces activités sont présentées dans la Figure 1.4 de la page suivante.

⁵ Pour obtenir cette masse salariale, Blanchette (2010) a multiplié le nombre d'emplois par le revenu annuel d'un mineur à 70 886 \$.

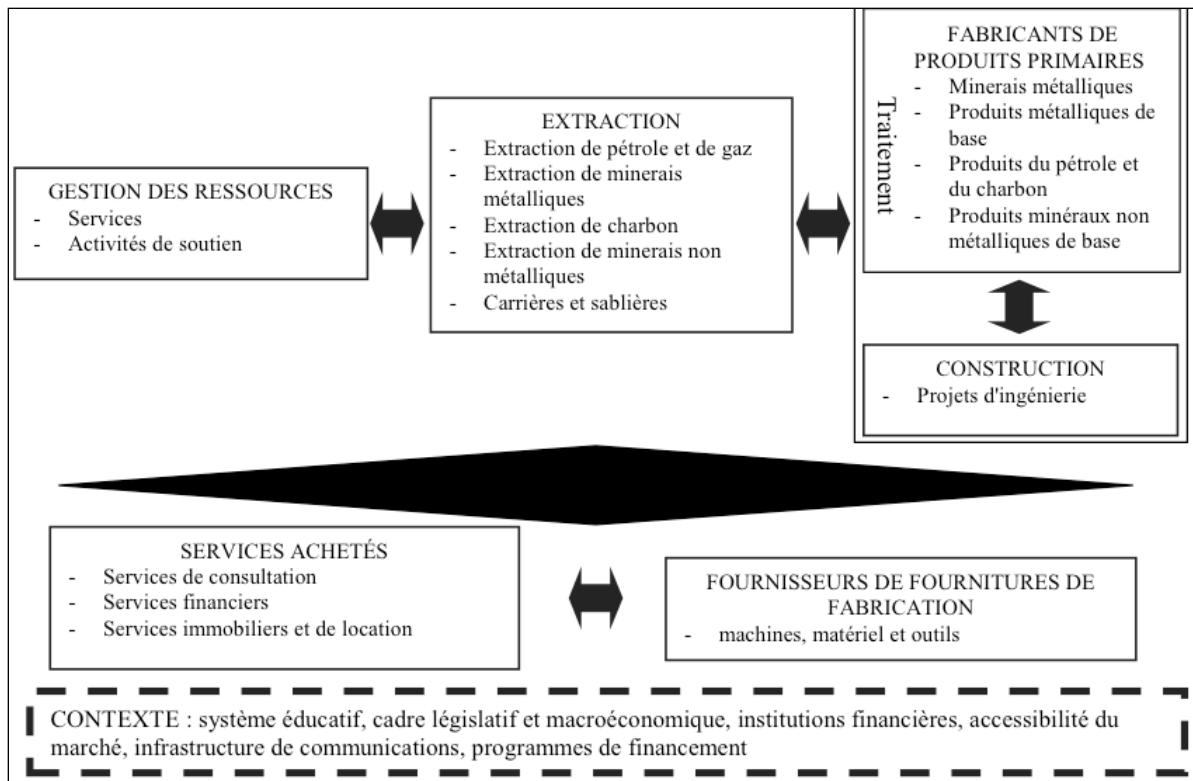


Figure 1.3 Système du secteur de l'extraction minière
Tirée de Statistique Canada (2002, p. 12)



Figure 1.4 Activités d'une entreprise d'extraction minière

Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons exclusivement sur les activités reliées à l'extraction du minerai. Les activités de l'exploration et du traitement de minerai ne seront donc pas étudiées.

En ce qui concerne l'activité de l'extraction du minerai, le leadership de l'Abitibi-Témiscamingue se confirme à la Figure 1.5 de la page 19. On y remarque la dominance du

territoire de l'Abitibi-Témiscamingue comme terre d'accueil chez les mines actives dans le portrait québécois. En fait, parmi les 16 mines de métaux actives en 2013, sept étaient situées sur le territoire de l'A-T. Et si l'on soustrait de cette liste les mines de fer et de titane, c'est un total de sept mines sur les 12 productrices de métaux usuels et précieux qui sont concentrées dans cette région. C'est donc plus de la moitié des mines (58,3 %) productrices de métaux usuels et précieux au Québec qui sont dans le paysage de l'A-T. Toujours sur la Figure 1.5, on remarque que cette concentration de mines est alignée sur ce qui est connu comme étant la « faille de Cadillac ». Cette carte indique également que la totalité de ces sept mines témiscabitibiennes sont productrices d'or et que seule la mine LaRonde extrait d'autres minéraux en plus de l'or, à savoir l'argent, le cuivre et le zinc. Finalement, sur ces sept mines productrices d'or, précisons que parmi ces sept mines aurifères témiscabitibiennes, seulement deux ont opté pour une méthode d'exploitation à ciel ouvert (*open pit*). Il s'agit des sites miniers de Canadian Malartic (Osisko) et de Monique (Mines Richmont). À l'exception de ces deux mines, toutes les autres sont souterraines.

Puisque la majorité des mines actives et productrices de métaux usuels et précieux au Québec sont situées dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, que l'ensemble des mines sur ce territoire sont productrices d'or et qu'une forte proportion (5 sur 7) de celles-ci sont souterraines, notre recherche se limitera donc aux mines aurifères souterraines de l'A-T.

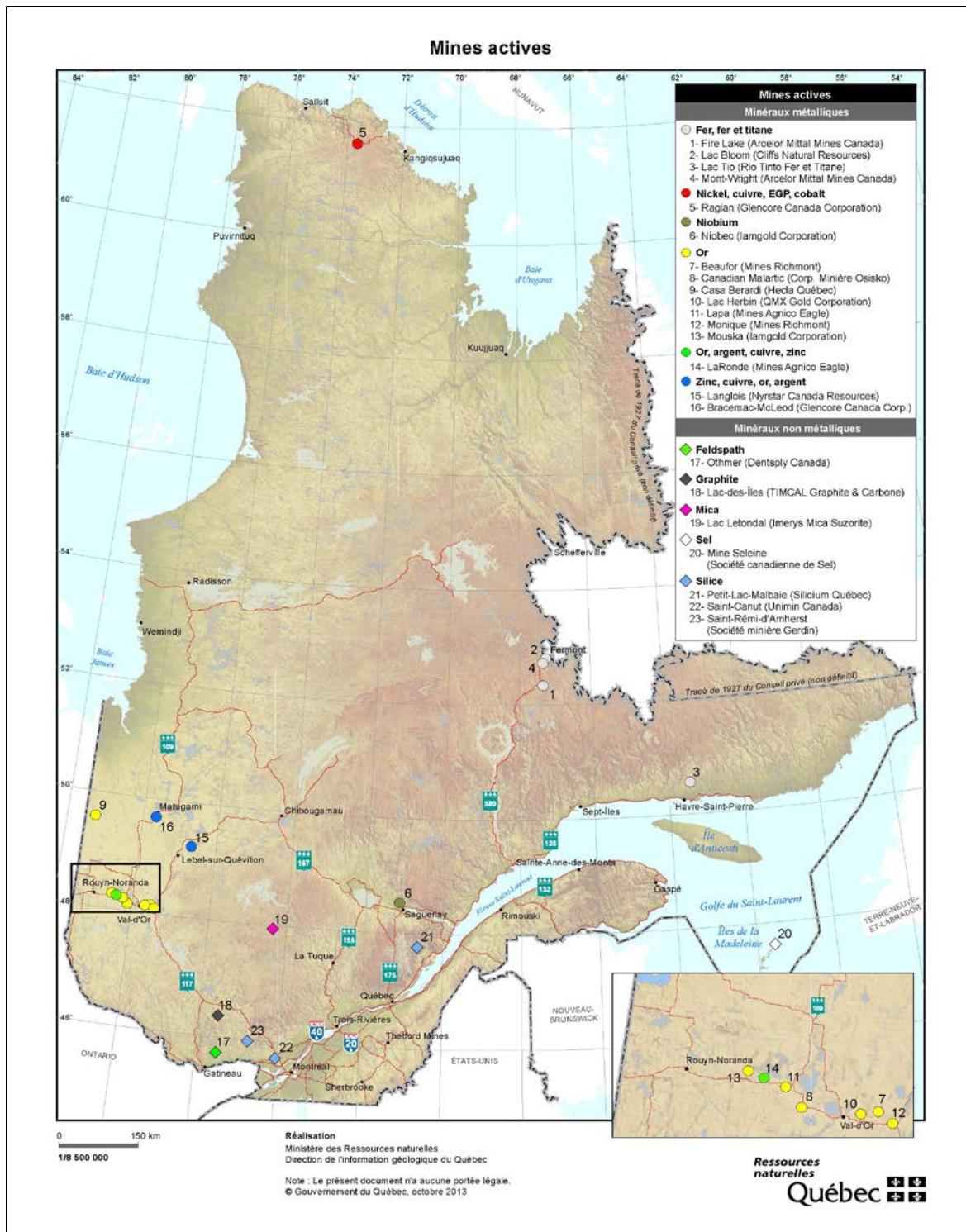


Figure 1.5 Mines actives au Québec en 2013
Tirée du Ministère des Ressources naturelles du Québec (2013a)

1.2.2 Design d'exploitation d'une mine souterraine

Puisque nous limitons notre étude aux mines souterraines, nous expliquerons brièvement ce qu'implique ce type d'exploitation. Hormis quelques exceptions, les mines souterraines témiscabitibiennes sont exploitées à partir d'un puits ou d'une rampe. La Figure 1.6 ci-dessous illustre ces deux types d'exploitation.

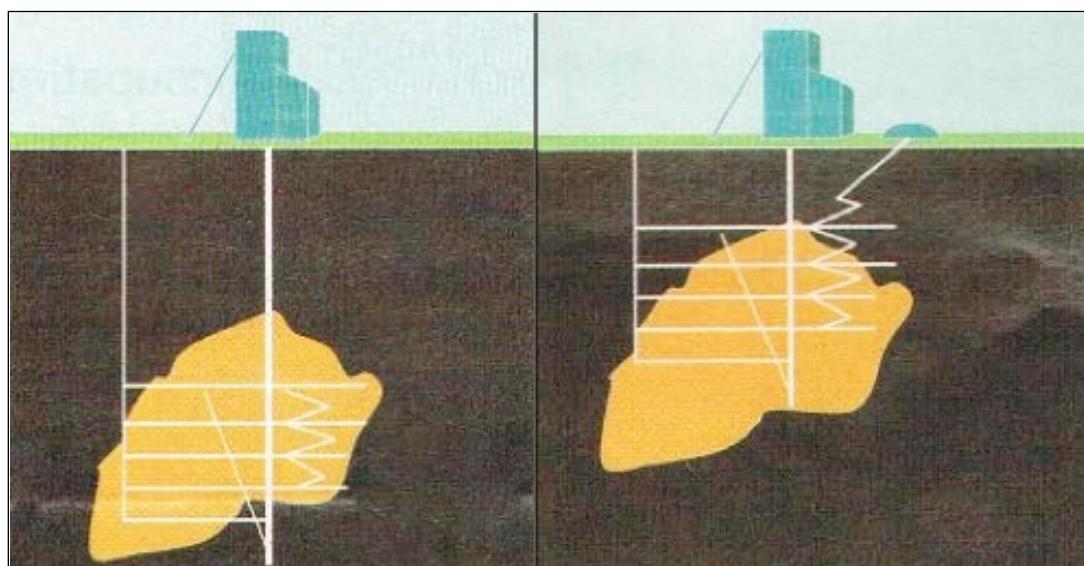


Figure 1.6 Méthodes d'exploitation d'une mine souterraine
Adaptée de Regroupement de l'industrie minière (2011)

Dans la partie gauche de cette Figure 1.6, on retrouve le schéma d'un puits alors qu'à droite nous avons le schéma d'une rampe. Dans le premier cas, il représente la seule alternative pour les gisements profonds. Étant donné son coût élevé, il faut des gisements dont la richesse permet de supporter les coûts de construction et de production. Ce design d'exploitation est utilisé, entre autres, par Agnico-Eagle Mining et Richmont. La deuxième option, la rampe, permet un démarrage rapide des opérations étant donné la proximité du gisement avec la surface. Dans certains cas, ces options peuvent être jumelées à la fosse (ciel ouvert). Par exemple, à la mine LaRonde, l'exploitation a débuté à ciel ouvert avant de poursuivre avec le fonçage d'un puits. Alors qu'à l'ancienne mine Sigma, les opérations ont d'abord été souterraines avant d'être à ciel ouvert. C'est d'ailleurs le cas du complexe minier

Osisko de Canadian Malartic qui exploite actuellement à ciel ouvert un gisement qui a été préalablement exploité de façon souterraine par d'autres entreprises dans le passé.

La Figure 1.7 de la page suivante est une représentation schématique d'une exploitation minière souterraine. Le cas présenté est celui d'un filon subvertical de roche dure, puisqu'en A-T les minières composent avec la roche dure. Nous pouvons voir qu'un point de soutirage est présent à la base du chantier d'abattage. C'est dans cette galerie de halage que s'affaire la chargeuse-navette pour récupérer et transporter la roche minéralisée qui vient d'être abattue par explosifs. Le minerai est ainsi transporté du point de soutirage à un point fixe de déchargement qui est souvent une embouchure d'une cheminée à minerai (voir Figure 1.7). Lorsque la distance à parcourir entre le point de soutirage et le point de déchargement est relativement courte, le transport du minerai est effectué par une CN. Si cette distance est relativement longue, on utilise une CN pour remplir la benne d'un camion qui se chargera du transport. Avec le camion à benne surbaissée, la capacité de chargement est plus élevée, ce qui diminue le nombre de va-et-vient dans les galeries.

En aval de la cheminée à minerai, on retrouve soit un concasseur, soit une chambre ouverte d'un chantier épuisé ou encore une benne de déversement positionné au-dessus de la voie d'un train de halage. Les galeries de halage, qui sont à des niveaux de profondeurs différents, sont reliées entre elles par des rampes d'accès en spirale. La surface de roulement des galeries de halage, de même que celle des rampes d'accès, est recouverte de roches concassées. L'entretien y est réalisé sporadiquement par une niveleuse ou une CN. L'état de cette surface composée de roches concassées est historiquement responsable de bon nombre de blessures aux chevilles et genoux (Donoghue, 2004).

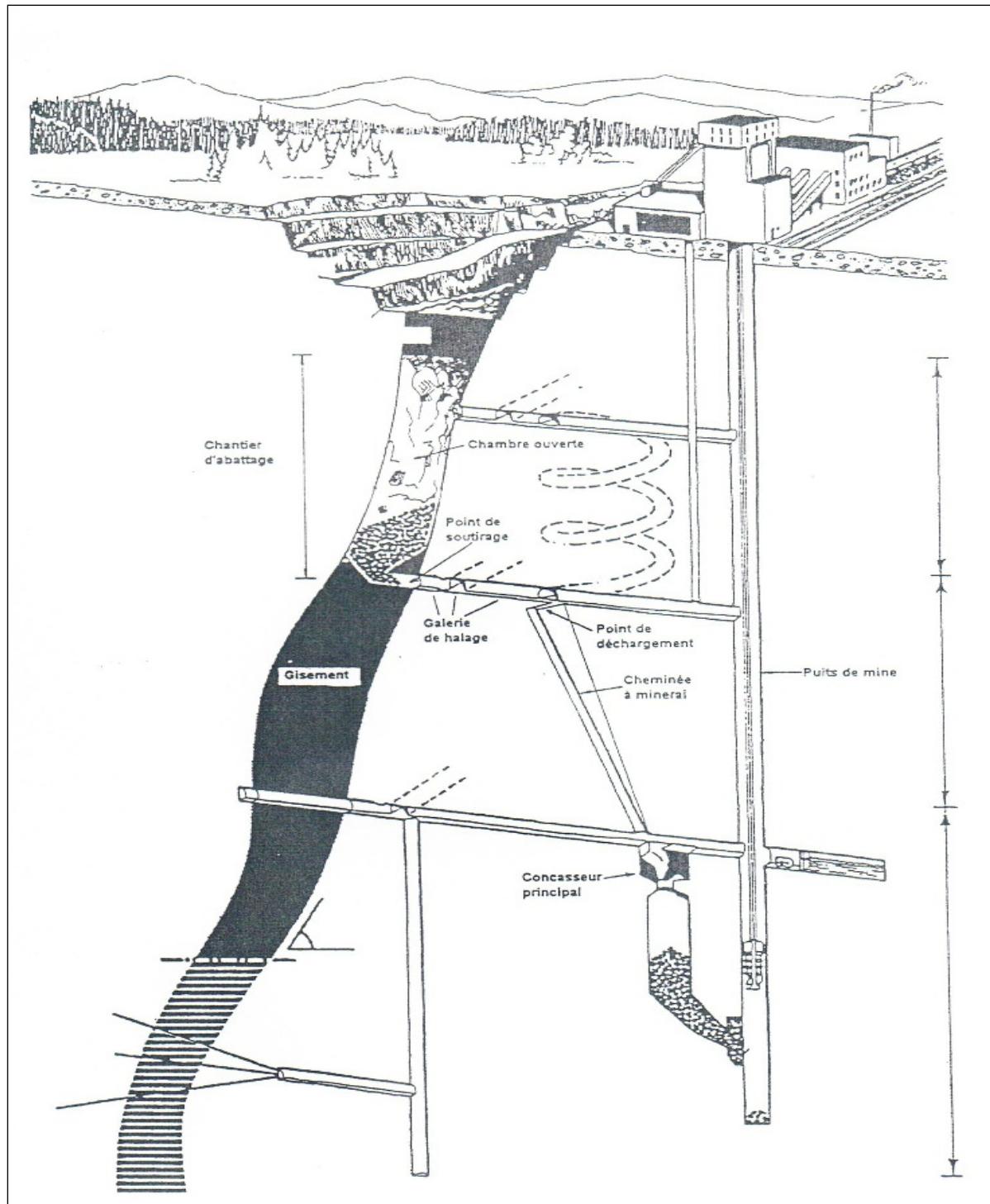


Figure 1.7 Représentation schématique d'une exploitation minière souterraine
Tirée de St-Amant (1992)

1.2.3 Innovation dans le domaine minier

Dans un premier temps, cette section situera l'objet de notre recherche à partir de la chaîne de l'innovation. Dans un deuxième temps, il sera question des sources d'innovations chez les entreprises minières. Dans un troisième temps, nous préciserons les définitions qui guideront notre démarche de recherche.

1.2.3.1 Chaîne de l'innovation industrielle

L'innovation est un concept très large en soi qui se doit d'être défini, car comme l'indique Boly (2008): « Il est difficile de présenter l'innovation tant ce terme est très largement diffusé voir banalisé. [...] Selon leur discipline d'origine, selon leur expérience, selon leurs intérêts, les auteurs abordent en effet cette notion de manière excessivement variée. » (Boly, 2008, p. 35). En fait, l'innovation se doit d'être définie selon son positionnement sur la chaîne de l'innovation industrielle. Dépendamment de son emplacement, l'innovation est de nature totalement différente. La chaîne de l'innovation industrielle est présentée dans la Figure 1.8 de la page suivante. La première étape, celle des ingrédients nouveaux, réfère à des innovations au niveau des nouveaux matériaux, par exemple l'arrivée des nanoparticules. Ces innovations sont utilisées pour la réalisation de la deuxième étape, celle des combinaisons améliorées qui sont en fait des innovations au niveau des composantes, composés ou modules. Ces innovations sont à leur tour à la base de la troisième étape de la chaîne. Cette troisième étape est celle des systèmes industriels (produits ou procédés) plus performants. Notre étude se limite à l'équipement utilisé pour les opérations sous terre, c'est donc exclusivement cette troisième étape de la chaîne qui nous intéresse. Ultimement, ce type d'innovation mène aux systèmes manufacturiers plus productifs.

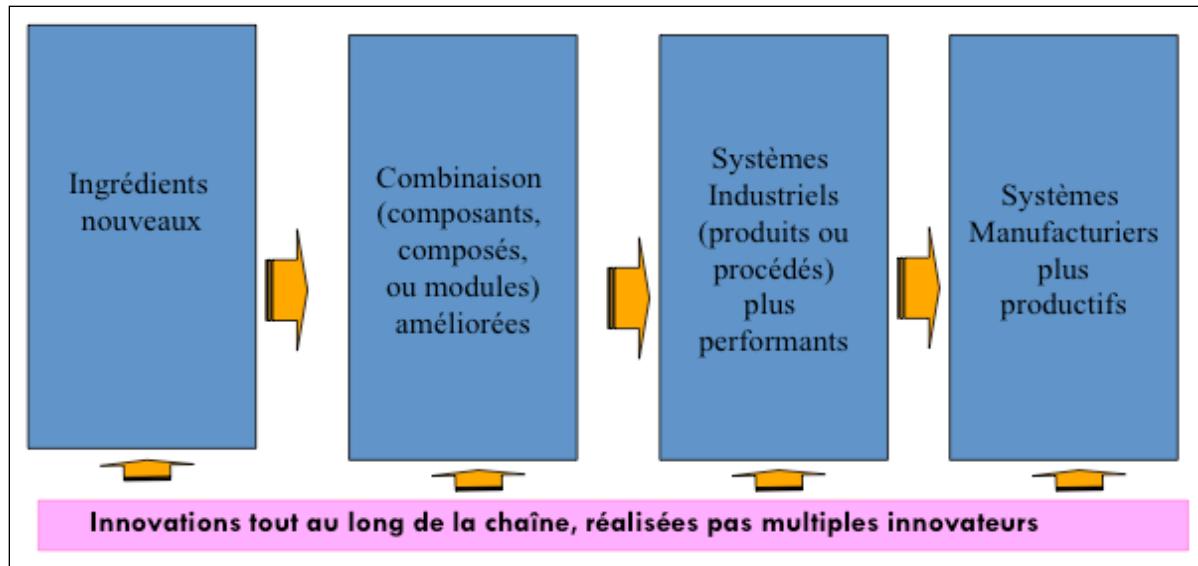


Figure 1.8 Chaîne d'innovation industrielle
Tirée de Deschamps (2011a, p. 5)

1.2.3.2 Sources d'innovation dans le domaine minier

Cette partie de l'étude identifie les sources d'innovation utilisées par les sociétés d'extraction minière désireuses de se développer dans l'environnement mondial concurrentiel tout en intégrant certaines contraintes dans leurs activités. Dans l'environnement actuel de concurrence internationale, l'innovation constitue un élément essentiel pour les entreprises minières (Klippel *et al.*, 2008). De même que pour les autres secteurs d'activités, l'industrie minière doit préserver une position concurrentielle sur les marchés internationaux (Saint-Pierre *et al.*, 1991; Kuhn, 1998; *Mining, Minerals and Sustainable Development* (MMSD), 2002; Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), 2009). L'innovation constitue donc une avenue intéressante pour cette industrie primaire témiscabitibienne si elle souhaite demeurer une chef de file. Les contraintes auxquelles les sociétés minières sont soumises sont :

- physiques : présence de gisements filoniers étroits obligeant une quantité d'extraction de minerai énorme pour une faible quantité de métaux;

- institutionnelles : respect de normes et de programmes de santé et de sécurité du travail ainsi que de protection de l'environnement (ce qui augmente de façon significative les frais d'exploitation);
- conjoncturelles : variation du prix des métaux sur le marché, des taux d'intérêts et des taux de change.

Avant de poursuivre, il convient de préciser aux lecteurs que les informations qui suivent sont en partie tirées de l'enquête de Statistique Canada sur l'innovation et l'utilisation de technologies de pointe dans le secteur de l'extraction minière au Canada: Extraction de minerais métalliques (2002). Puisqu'aucune étude n'a été réalisée exclusivement avec les minières aurifères souterraines de l'A-T, nous croyons tout de même intéressant de soulever les résultats de cette enquête menée auprès de 83 entreprises canadiennes du secteur de l'extraction de minerais métalliques. Nonobstant le fait que cette étude date de 2002, les tendances articulées dans cette étude sont corroborées par des études plus récentes (Upstill et Hall, 2006; Bartos, 2007).

Nous pouvons distinguer à la Figure 1.9 de la page suivante, que parmi les entreprises innovatrices de la branche de l'extraction de minerais métalliques, toutes les entreprises sont innovatrices du point de vue des procédés, alors qu'aucune entreprise de cette branche n'adopte des innovations du point de vue des produits seulement.

Cette tendance se traduit par une importante réalité des entreprises en extraction de minerais métalliques: elles n'ont pas besoin de nouveaux produits pour satisfaire leurs clients. Cette affirmation est soutenue par la nature même des produits. Étant donné que le produit est une matière brute, comme l'or par exemple, le cycle de vie est virtuellement infini et ne nécessite donc pas de changements que réclame habituellement une clientèle pour un produit au cycle de vie plus court.

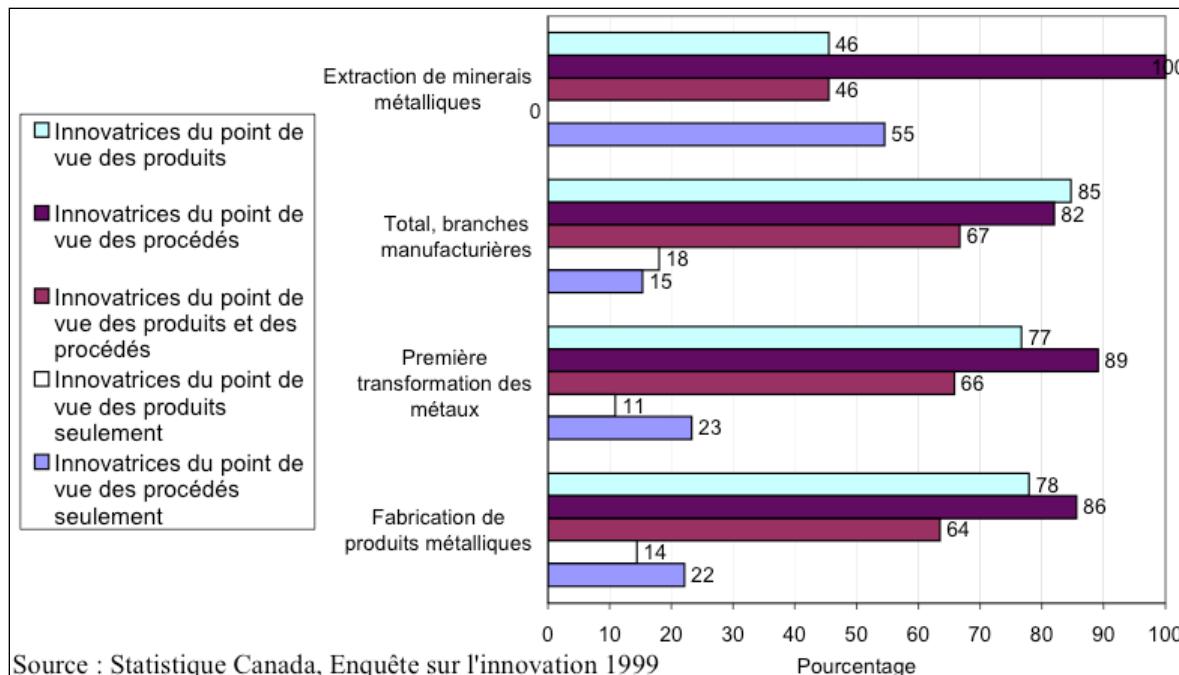


Figure 1.9 Pourcentage d'entreprises innovatrices selon le type d'innovation

Tirée de Statistique Canada (2002, p. 14)

Cette tendance des entreprises de l'extraction de minerais métalliques à focaliser l'innovation sur les procédés n'est pas unique au Canada. Plusieurs études menées par l'*Australian Bureau of Statistics* (1998) ont également démontré le favoritisme des innovations du point de vue des procédés dans le domaine minier.

Lorsque questionnées sur les raisons motivant leurs décisions d'innover en matière de procédé, les entreprises d'extraction de minerais métalliques innovatrices ont majoritairement répondues par des objectifs de production. L'augmentation de la capacité de production (67,5 %), la réduction du coût de la main-d'œuvre (59,7 %), l'accroissement de la souplesse de production (51,9 %) et la diminution de la consommation d'énergie (51,3 %) viennent en tête de liste. Mentionnons que seulement 3,1 % de ces entreprises ont répondu le remplacement de produits éliminés graduellement. Ce qui est totalement cohérent avec les réponses obtenues précédemment, à savoir que les innovations de procédés sont beaucoup plus populaires que les innovations de produits chez les entreprises d'extraction de minerais métalliques innovatrices.

Tel que démontré au Tableau 1.3 ci-dessous, pour 95 % des entreprises d'extraction de minerais métalliques se disant innovatrices, la principale source d'innovation est l'acquisition de machinerie, d'équipements, d'outils informatiques ou encore de logiciels.

Tableau 1.3 Pourcentage des entreprises ayant acquis des machines et équipements ou d'autres technologies liés à l'innovation
Adapté de Statistique Canada (2002, p. 22)

	% d'entreprises ayant acquis des machines, des équipements ou d'autres technologies liés à l'innovation	
	Toutes	Innovatrices
Extraction de minerais métalliques	60,0	95,0

Dans une autre étude, celle de l'Enquête sur le commerce électronique et la technologie (ECET) de 2000 (Statistique Canada, 2002), il a été question des améliorations technologiques dans les branches minières, manufacturières et manufacturières primaires du secteur de l'extraction minière. Cette enquête, fondée sur un échantillon de 177 entreprises du secteur minier, démontre qu'une très grande majorité des entreprises du secteur minier réagissent aux nouvelles technologies en les achetant telles quelles. On n'est donc pas surpris de constater que l'implication active dans le développement de nouvelles technologies n'est pas une pratique répandue dans le secteur minier. Comme le démontre le Tableau 1.4 ci-dessous, moins d'une entreprise sur dix qui a adopté de nouvelles technologies les avait elle-même développées. Un autre fait intéressant est celui indiquant que 83 % des entreprises ayant adopté des technologies avaient des besoins de formation concernant celles-ci.

Ces résultats sont également corroborés par les études d'Upstill et Hall (2006) et de Bartos (2007) qui démontrent une certaine cohérence avec ce qui se passe ailleurs dans le monde. Bartos (2007) affirme d'ailleurs qu'il y a de moins en moins d'investissements octroyés au développement de technologies dans le domaine minier.

Tableau 1.4 Améliorations technologiques dans les branches minières, manufacturières et manufacturières primaires du secteur de l'extraction minière
Tiré de Statistique Canada (2002, p. 24)

	% d'entreprises qui adoptent des technologies sensiblement améliorées	% d'entreprises ayant des technologies améliorées et adoptant de nouvelles technologies par :				% d'entreprises ayant adopté des technologies améliorées qui ont besoin de formation
		l'achat de technologies telles quelles	l'octroi de licences pour l'utilisation de nouvelles technologies	la personnalisation ou la modification importante de technologies existantes	l'élaboration de nouvelles technologies	
Extraction minière (sauf l'extraction du pétrole et du gaz)	50,3	68,1*	12,3	46,3*	9,8	83,0
Fabrication	50,6	70,8	14,8	51,0	22,8	73,4
Première transformation des métaux	59,1	51,9*	10,2	59,2*	37,7	71,7*
Fabrication de produits métalliques	39,3	73,2	20,0	43,6	19,6	74,9

Ces innovations, rattachées à l'augmentation de la performance de la machinerie, sont plutôt venues des manufacturiers d'équipements. Les entreprises minières ont simplement récolté les fruits des investissements provenant de ces manufacturiers d'équipements. Selon M. Sproul, représentant chez Caterpillar, il semble maintenant que les compagnies minières se fient sur les manufacturiers d'équipements pour développer la technologie minière à leur place, au lieu de développer eux-mêmes des technologies via la recherche et le développement (Yudelman, 2006).

Ainsi, la plupart des entreprises minières ont opté pour une stratégie d'achat de technologies, c'est-à-dire qu'elles laissent une tierce entité développer la nouvelle technologie ou pratique (aux frais de cette tierce partie) et adoptent la technologie une fois que celle-ci a fait ses preuves (Bartos, 2007). D'où l'explication pour le ratio de recherche et de développement (R&D) acquis très élevé dans ce domaine. Cette façon de s'approprier les innovations se retrouve dans le bas (décentralisateur) et sous la colonne « achat techno » de la Figure 1.10 présentée ci-dessous.

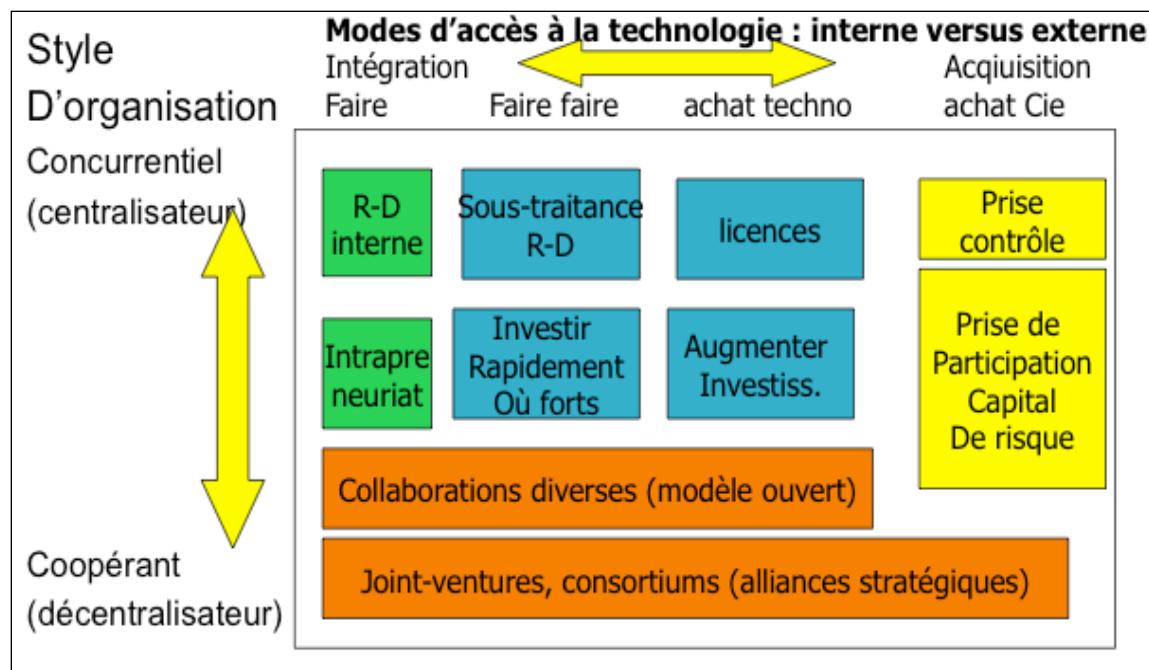


Figure 1.10 Voies d'accès à l'innovation
Tirée de Deschamps (2011b, p. 69)

Comme nous pouvons le constater, les entreprises d'extraction minière n'ont pas de propension pour l'élaboration de nouvelles technologies, elles préfèrent plutôt les acheter telles quelles auprès de fabricants spécialisés.

Par contre, nous ne pouvons passer sous silence quelques cas exceptionnels où collaborations entre constructeurs et utilisateurs sont nées et ont porté fruits. À ce titre, nous pouvons mentionner la coopération étroite entre Atlas Copco (constructeur) et Rio Tinto (utilisateur) qui a produit deux solutions innovantes pour l'exploitation en souterrain: le Scooptram automatisé pouvant être dirigé par un opérateur confortablement assis face à un écran, plusieurs kilomètres au-dessus des tunnels où l'engin charge, transporte et décharge ; et la haveuse modulaire pouvant creuser des parois de roches extrêmement dures à plus de 1,5 km de la surface, avec une agilité supérieure à n'importe quel tunnelier et un plus faible impact sur l'environnement (Atlas Copco, 2010).

Le Groupe MISA (Mines, Innovation, Solutions, Applications) est également le fer de lance de plusieurs collaborations fructueuses au Québec. Par exemple, il y a le projet 500 qui a été

réalisé conjointement par les Laboratoires des mines et des sciences minérales de CANMET, l'Université de Sherbrooke, le manufacturier Parts HeadQuarters, l'Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) et la société minière Goldcorp Inc. Les travaux de R&D de ce projet ont permis l'élaboration d'une poignée de foreuse à béquille qui réduit de plus de 60 % les vibrations dommageables transmises aux travailleurs par la foreuse (Le Groupe MISA, 2011). À cela s'ajoute le Conseil canadien de l'innovation minière (CCIM), dont la vision, qui est de veiller à ce que le Canada soit un chef de file mondial de l'industrie minière grâce à la recherche et à l'innovation de pointe, s'appuie sur un partenariat entre l'industrie minière, les associations, les universités et le gouvernement (CCIM, 2010). Soulignons également la mise en place, en janvier 2014 au Canada, d'un important réseau de recherche de 46 millions de dollars qui porte le nom de l'*Ultra-Deep Mining Network* (UDMN). L'une des visées de ce nouveau réseau est d'être le moteur de collaborations fructueuses entre l'industrie minière et les entités de recherches afin de répondre aux défis de l'extraction de minerai en environnements ultra-profonds (CEMI, 2014). Il y a donc quelques débuts de collaborations et d'alliances entre les entreprises d'extraction minière avec des partenaires (fournisseurs, universités et institut de recherche) lorsque vient le temps d'innover (voir Figure 1.10 de la page précédente, sous « Collaborations diverses – modèle ouvert »). Ce type d'innovation est typique de ce qui est défini dans la littérature par l'innovation ouverte (*open innovation*, voir Chesbrought, 2003). Cependant, rappelons que ce type d'innovation n'est pas la norme dans le domaine de l'extraction minière et que les entreprises de ce secteur préfèrent, à l'inverse, faire l'acquisition de l'équipement directement d'un fabricant.

Pour résumer cette partie, nous pouvons affirmer que les entreprises en extraction de minerais métalliques ont une préférence marquée pour les innovations de procédés, alors que le taux d'innovation de produits est nul. En fait, toutes les entreprises d'extraction de minerais métalliques se déclarant innovatrices sont innovatrices du point de vue des procédés. Les motivations de ces entreprises face aux innovations visent majoritairement l'augmentation de la capacité de production, la réduction du coût de la main-d'œuvre, l'accroissement de la souplesse de production et la diminution de la consommation d'énergie.

Pour ces entreprises d'extraction de minerais métalliques, les innovations dépendent historiquement d'achats auprès de leurs fournisseurs informés de leurs problématiques ou exigences au lieu de les élaborer elles-mêmes.

1.2.3.3 Innovation en équipement minier souterrain

Pour baliser le cadre de notre recherche, nous utiliserons les définitions du Manuel d'Oslo publié par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et qui est reconnu comme étant une référence dans le domaine de l'innovation. Comme l'indique Statistique Canada (2009) qui se base sur cette définition dans ses études, le Manuel d'Oslo fournit des lignes directrices internationales pour la cueillette et l'interprétation des données sur l'innovation.

Comme nous l'avons précisé, le type d'innovation qui nous intéresse est celui des procédés⁶. Selon le Manuel d'Oslo (OCDE, 2005): « Une innovation de procédé est la mise en oeuvre d'une méthode de production ou de distribution nouvelle ou sensiblement améliorée ». Cette nouvelle méthode implique des modifications portant sur l'équipement ou l'organisation de la production, ou encore sur une combinaison de ces modifications, et peut provenir de la mise à profit de nouvelles connaissances.

Plusieurs raisons motivent l'implantation de ce type d'innovation. Les principales raisons sont les bénéfices associés aux coûts unitaires de production plus bas, à l'augmentation des volumes produits, à l'augmentation de la flexibilité, à l'augmentation de la qualité et également à l'amélioration des conditions de santé et de sécurité des travailleurs (OCDE, 2005).

⁶ L'annexe IV de la présente thèse propose aux lecteurs une revue de littérature portant sur des concepts importants de l'innovation.

Ces nouvelles méthodes de production peuvent se présenter sous différents degrés de nouveauté. Par exemple, dans le cas d'une nouveauté pour le monde, il s'agit d'une innovation maximale (voir Tableau 1.5). Dans le cas d'une nouveauté pour une région géographique, il s'agit d'une innovation intermédiaire et finalement, dans le cas d'une nouveauté pour la firme, il s'agit d'une innovation minimale. Dans les trois cas, il est question d'une innovation.

Tableau 1.5 Type et degré de nouveauté et définition de l'innovation
Adapté de l'OCDE (1997, p.39)

			INNOVATION			Pas une innovation
			Maximale	Intermédiaire	Minimale	
INNOVATION	Technologiquement nouveau	Produit				
		Procédé de production				
		Procédé de livraison				
	Amélioration technologique importante	Produit				
		Procédé de production				
		Procédé de livraison				

Comme exemple de nouvelles méthodes de production dans le domaine minier, on peut mentionner l'arrivée des foreuses jumbos dans les chantiers miniers à la fin des années 1970-1980 (Graham et Evans, 2008). Ces foreuses nouvelles générations ne laissent plus de place aux maux dorsaux ou de poignets résultant de la vibration produite par les anciennes foreuses manuelles. En plus d'offrir une hausse sur le plan de la productivité, ces foreuses jumbos sont aujourd'hui disponibles avec propulsion électrique réduisant ainsi les émissions de gaz carboniques dans les galeries (AMQ, 2011).

On innove donc dans le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs, mais dans tous les cas pour arriver à un résultat qui touche la performance de l'entreprise (Meier et Schier, 2007). Pour corroborer cette explication, nous pouvons souligner les propos de Drucker (1985) qui explicite bien cette caractéristique en affirmant que l'innovation est un changement créant une nouvelle dimension de performance. Parmi les dernières innovations en équipements

miniers, soulignons l'arrivée d'équipements en partie automatisée. Ce type d'équipement fait d'ailleurs l'objet de la prochaine section.

1.2.3.4 Automatisation en équipement minier souterrain

L'automatisation est largement définie comme la gestion intelligente d'un système utilisant la technologie appropriée pour que son opération puisse se réaliser sans une participation humaine directe (Sheridan, 2002). Dans l'industrie minière, l'automatisation est généralement exécutée par des systèmes assistés par ordinateur et touche autant les composants de systèmes, comme le simple contrôle d'une valve, que les systèmes de commande complets, par exemple le contrôle à distance d'une pelle à benne (Lynas et Horberry, 2011). Les tâches associées à l'équipement automatisé varient donc de simples à complexes.

Le but ultime des minières est de pouvoir contrôler à partir de la surface la machinerie utilisée sous terre. Cela aurait plusieurs avantages au niveau de la sécurité, de la productivité et en économie de temps. Par exemple, la recherche de Jämsä-Jounela et Baiden (2009) indique qu'un opérateur est en mesure de diriger à distance trois machines simultanément depuis la surface. L'étude de Konyukh (2007), via simulation, prétend qu'un seul opérateur peut diriger à distance de trois à cinq machines. Cela réduit considérablement le nombre d'opérateurs nécessaires, donc une économie en termes de coûts d'opération et en plus, le fait de limiter le temps sous terre fait en sorte que les opérateurs sont moins exposés aux risques qui s'y trouvent. Mais encore, les tests effectués par Jämsä-Jounela et Baiden (2009) ont démontré qu'une CN contrôlée depuis la surface peut être en opération 23 heures sur un total de 24, contrairement à seulement 15 heures lorsque le véhicule est dirigé par un opérateur depuis la cabine du véhicule sous terre. Le fait d'avoir une vue d'ensemble du positionnement de tous les véhicules sous terre permet ainsi une meilleure gestion et communication du trafic souterrain, donc moins d'arrêts pour l'équipement. Une meilleure utilisation de l'équipement représente ainsi des économies de capitaux substantiels puisque l'on a besoin de moins de véhicules. Finalement, les derniers résultats de Jämsä-Jounela et Baiden (2009) ont permis de déterminer que la durée de vie d'une mine peut être réduite de

38% en utilisant des contrôles à distance depuis la surface pour diriger l'exploitation comparativement au moyen de contrôle actuel (opérateur qui dirige le véhicule à partir de la cabine du véhicule sous terre). Une durée de vie réduite devient très intéressante puisqu'elle représente les mêmes revenus pour des dépenses allégées.

Toutefois, l'utilisation de ce type de véhicule contrôlé depuis la surface n'est pas très répandue. Aucune mine souterraine témiscabitibienne n'en utilise. En fait, seulement trois sites miniers en Amérique du Nord en utilisent, il s'agit de Elko (Nevada), Helmo Camp et Kidd Creek (Ontario). L'une des raisons qui expliquent leur faible popularité vient de leur mauvaise réputation en termes de maintenance et de fiabilité (Gustafson, 2011). Soulignons également que même si l'opérateur n'intervient que rarement, lorsque le système de protection a une défaillance cela demeure dangereux en plus de créer un arrêt de production dans bien des cas, ce qui est très coûteux (Thivierge, 2007).

De plus, selon Lynas et Horberry (2011), il est clair que la supposition quelquefois entendue que l'automatisation remplace des gens n'est pas correcte et qu'à l'inverse, elle change plutôt la nature du travail pour les ouvriers. De plus, ce changement de nature survient souvent de façon fortuite et imprévue pour les concepteurs d'automatisation.

Horberry *et al.* (2011) classifie l'automatisation et les nouvelles technologies du domaine minier sous trois larges catégories basées sur le système de contrôle:

- *Niveau bas d'automatisation*, ce qui comprend les systèmes d'avertissement comme les systèmes de détection de proximité et les technologies qui signalent la maintenance d'équipement. Sous cette catégorie, l'opérateur est en plein contrôle du système, en tout temps, alors que la technologie fournit un avertissement ou une assistance;
- *Niveau moyen d'automatisation*, ce qui peut impliquer l'enlèvement du contrôle à l'opérateur à certains moments, ou encore, lorsque l'opérateur a le contrôle de

l'équipement à partir d'un endroit rapproché. Les exemples incluent l'utilisation d'équipements pendant les opérations de routine où l'opérateur est un moniteur passif, mais il peut commander si l'intervention est jugée nécessaire. Comme autres exemples il y a le contrôle de ligne de visée de l'équipement souterrain de même que les technologies de détection de collision qui arrêtent automatiquement l'équipement lorsqu'une collision est détectée comme imminente. Dans cette catégorie, l'opérateur est en contrôle de l'équipement la plupart du temps, mais certaines fonctions sont automatiquement contrôlées par le système et supervisées par l'opérateur;

- *Automatisation complète*, ce qui implique que l'opérateur se trouve loin de l'équipement et qu'il dirige l'équipement depuis un écran d'ordinateur, des manettes et autres commandes.

Soulignons au passage que les équipements et les véhicules automatisés utilisés sous terre fonctionnent généralement au diésel, ce qui génère du monoxyde de carbone, des suies et des gaz nitreux. Les gaz d'échappement des moteurs diésel ont d'ailleurs été reconnus cancérogènes par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) en 2012 (OMS, 2012). Cette décision fait suite à la publication d'une méta-analyse menée aux États-Unis (Silverman *et al.*, 2012) démontrant le risque accru de décès par cancer du poumon chez les mineurs de fonds exposés aux émanations de diesel.

1.3 Questions de recherches et ses objectifs

Nous avons initialement soulevé le fait que les entreprises minières, dans le but de demeurer concurrentielles, investissent dans de nouvelles technologies en équipement (Bullock, 2000; Planeta et Paraszczak, 2000; Nielsen et Gether, 2004; Upstill et Hall, 2006). Toutefois, nous avons mis en doute le fait que l'introduction d'un nouvel équipement puisse améliorer la productivité (Dhillon, 2010; Lynas et Horberry, 2011; Ruff *et al.*, 2011; CEMI, 2013). Nous avons également démontré, avec l'appui de plusieurs statistiques et de recherches, que l'arrivée d'un nouvel équipement peut apporter de nouveaux éléments de risque en SST pour

les opérateurs (Eger *et al.*, 2004; Kumar, 2004; Dragt *et al.*, 2005; Eger *et al.*, 2006; Coleman et Kerkering, 2007; Smets *et al.*, 2010; Ouellet *et al.*, 2011). Compte tenu du fait que ces équipements innovants sont souvent dispendieux⁷, les résultats sont d'autant plus inquiétants. Par ailleurs, nous avons expliqué que les mines, et à forte proportion les mines aurifères souterraines, constituent le poumon économique de la région de l'Abitibi-Témiscamingue.

Ce chapitre de mise en contexte dégage ainsi plusieurs interrogations intéressantes pour ce domaine et pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue en particulier. Ces questions peuvent être énoncées comme suit:

- Quel a été l'impact de l'introduction d'équipements innovants sur la performance en productivité chez les mines aurifères souterraines témiscabitibiennes?
- Quel a été l'impact de l'introduction d'équipements innovants sur la performance en SST chez les mines aurifères souterraines témiscabitibiennes?
- Quels sont les facteurs de succès favorisant l'implantation des équipements innovants chez les mines aurifères souterraines témiscabitibiennes?

Découlant de ces questions, nous avons identifié les deux objectifs de recherche suivants:

1. Déterminer si l'innovation en équipement a amélioré la performance en productivité, ainsi qu'en SST dans le domaine minier aurifère souterrain témiscabitibien.
2. Déterminer si certains facteurs de la gestion de l'innovation peuvent avoir un effet de levier sur l'interrelation entre innovation, santé-sécurité et productivité dans le domaine minier aurifère souterrain témiscabitibien.

⁷ Camion à benne, chargeuse-navette, foreuse et boulonneuse ont tous un coût d'achat avoisinant le million de dollars.

Notre premier objectif de recherche va permettre d'avoir une meilleure compréhension de l'impact de l'équipement innovant en termes de productivité ainsi qu'en termes de SST pour les entreprises minières souterraines de l'A-T. Alors que notre deuxième objectif va apporter un éclairage sur les facteurs favorisant l'implantation de ces équipements innovants. L'identification de ces facteurs de succès constituerait une information précieuse pour les entreprises minières de cette région. En effet, les facteurs clés permettraient à ces entreprises de mieux verbaliser leurs besoins afin que l'implantation entraîne une amélioration de la performance en productivité et en SST. Considérant les coûts associés à l'achat, à la formation de main-d'oeuvre, à la période d'interprétation, de structuration, de normalisation et de régulation ergonomiques du système homme-technologie, ces facteurs de réussite pourraient valoir leur pesant d'or.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce deuxième chapitre porte sur la méthodologie de recherche. Il vise donc à définir l'approche et les outils utilisés dans la thèse afin d'atteindre les objectifs établis au chapitre précédent. Nous débuterons ainsi par établir le fondement méthodologique sur lequel repose notre recherche (section 2.1). Par la suite, nous exposerons notre choix méthodologique (section 2.2) avant de développer sur les différents aspects entourant notre cueillette de données (section 2.3). Nous détaillerons et justifierons ensuite les différents modes de traitement de données que nous avons privilégiés (section 2.4). Finalement, nous présenterons la structure des prochains chapitres de la thèse (section 2.5), ce qui permet de mettre en évidence les différents liens établis dans le présent chapitre. Ces prochains chapitres dévoileront les résultats de notre étude qui ont fait l'objet d'articles publiés, acceptés ou soumis à des revues scientifiques avec comité de pairs.

2.1 Fondement méthodologique de la thèse

D'emblée, précisons que la recherche et la réflexion scientifiques de cette thèse sont inscrites dans un paradigme épistémologique constructiviste. Dans cette perspective, la connaissance scientifique ne cherche pas à prendre la valeur de vérité absolue, mais plutôt comme un des modèles satisfaisants, intéressants, utiles et viables dans des contextes et par rapport à des projets conçus (Fourez, 2002). Comme l'explique Ruel (1992), les connaissances sont jugées viables: « non pas parce qu'elles correspondent à la réalité des choses telles qu'elles sont, mais dans la mesure où elles leur permettent d'organiser le monde des expériences et de résoudre les problèmes auxquels ils ont à faire face ». De plus, cette caractéristique de viabilité implique que la connaissance est "vivante", ouverte, en évolution continue et prête à une remise en question afin d'être bonifiée (Deschênes *et al.*, 1996). En fait, nous sommes du même avis que Confrey (1994) et Pépin (1994) à l'effet que la fonction première de la connaissance en est une d'adaptation servant à la compréhension et à l'organisation du monde. Dans le cadre de notre recherche, cela se traduit par la compréhension des facteurs et

conditions nécessaires à une implantation d'innovation minière réussie en termes de productivité et de SST. Notons également que la construction de cette connaissance dans notre étude est appuyée en partie sur des outils construits et utilisés par les acteurs de ce domaine (outils permettant de mesurer la performance), de même que sur l'intersubjectivité entre les parties prenantes (superviseurs et opérateurs). L'intersubjectivité et les interactions sociales étant importantes dans notre étude, nous pouvons donc affirmer qu'il s'agit d'une recherche inscrite dans un prolongement de la perspective constructiviste, à savoir le socio-constructivisme (Glaserfield, 1994).

Pour répondre à nos objectifs de recherche préalablement définis au chapitre 1, nous avons suivi la démarche méthodologique présentée dans la Figure 2.1. La première phase de notre recherche se veut de type exploratoire. Puisque peu d'informations existent sur le sujet de la gestion de l'innovation minière et que le sujet est encore mal élucidé, la recherche exploratoire est le type d'étude à privilégier (Fortin, 2010). Nous devons donc agir à titre de précurseur et orchestrer un travail de défrichage du sujet en question. Dans cette phase de recherche exploratoire, on débute par l'identification de la problématique qui nous permet ensuite d'élaborer les questions sous-jacentes à la recherche. Les choix méthodologiques guident par la suite le déroulement de la recherche. S'en suit la collecte de données qui, dans notre cas, se réalise en trois étapes: 1- une revue de littérature permet initialement de relever les facteurs et conditions pouvant avoir un impact sur l'effet de levier entre innovation, productivité et SST; 2- une recherche dans les bases de données de l'entreprise participative; 3- des entrevues semi-dirigées avec les acteurs importants. La dernière étape de la phase exploratoire de notre recherche est celle du traitement de données à l'aide de différents tests statistiques.

La deuxième phase de notre recherche est de type explicative. Comme l'explique Lefrançois (1991), la recherche explicative permet d'assigner des causes aux phénomènes et à montrer la séquence ou l'enchaînement causal produisant l'effet observé. Dans le cadre de notre recherche, cette deuxième étape est possible grâce à l'utilisation des résultats obtenus lors de la recherche exploratoire. Ces résultats sont ainsi mis à profit à travers l'utilisation d'un outil

d'aide à la décision. Cet outil, de la famille de l'intelligence artificielle, consiste à construire une table décisionnelle à partir de laquelle on extrait des règles de décision. Dans notre étude, ces règles permettent d'expliquer quelles sont les conditions nécessaires pour obtenir tel résultat. Finalement, l'interprétation de ces résultats apporte les réponses aux questions initialement soulevées.

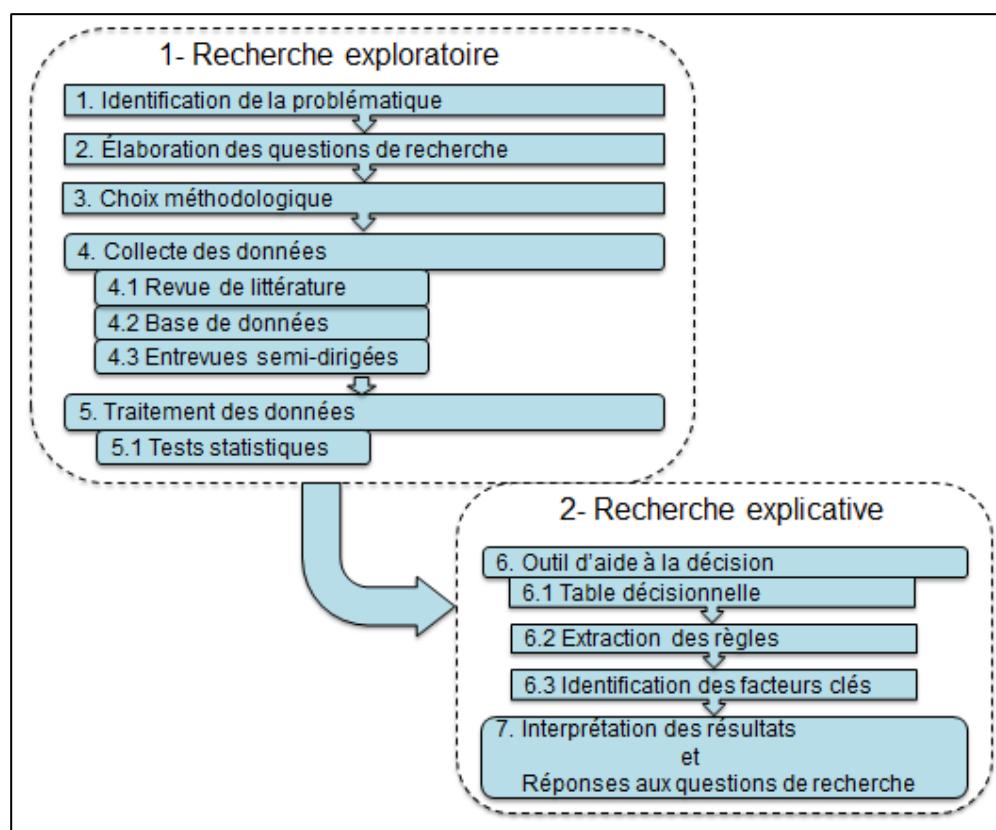


Figure 2.1 Démarche méthodologique de la thèse

2.2 Choix méthodologique

Le projet de recherche s'intéresse à un environnement précis, celui de l'exploitation minière souterraine aurifère. Mais encore, nous cherchons à approfondir les connaissances sur l'impact des innovations en équipement sur la performance de ce domaine, de même que les facteurs ayant un rôle dans cette performance. Pour parvenir à cet approfondissement de connaissances, nous avons privilégié l'étude de cas comme méthode de recherche. Ce choix

se justifie dans l'explication de Gagnon (2005) à l'effet que les forces de l'étude de cas sont de fournir une analyse en profondeur des phénomènes dans leur contexte, d'offrir la possibilité de développer des paramètres historiques et d'assurer une forte validité interne (que les phénomènes relevés sont des représentations authentiques de la réalité étudiée). Ces forces nous permettent de répondre à nos objectifs de recherche en poursuivant nos deux phases de recherches (Figure 2.1), car comme le souligne Woodside et Wilson (2003) l'étude de cas peut être descriptive, exploratoire, explicative ou évaluative. De plus, afin de bien comprendre les interrelations pouvant avoir une influence favorable dans l'implantation d'une innovation en équipement, une vision holistique est préférable (Atun, 2012). Avec une telle vision, l'étude de cas est une approche appropriée (Yin, 2009).

2.2.1 Démarche d'une étude de cas

L'étude de cas adoptée pour notre thèse est celle de Gagnon (2005). Cette méthode suit les huit étapes présentées dans la Figure 2.2.

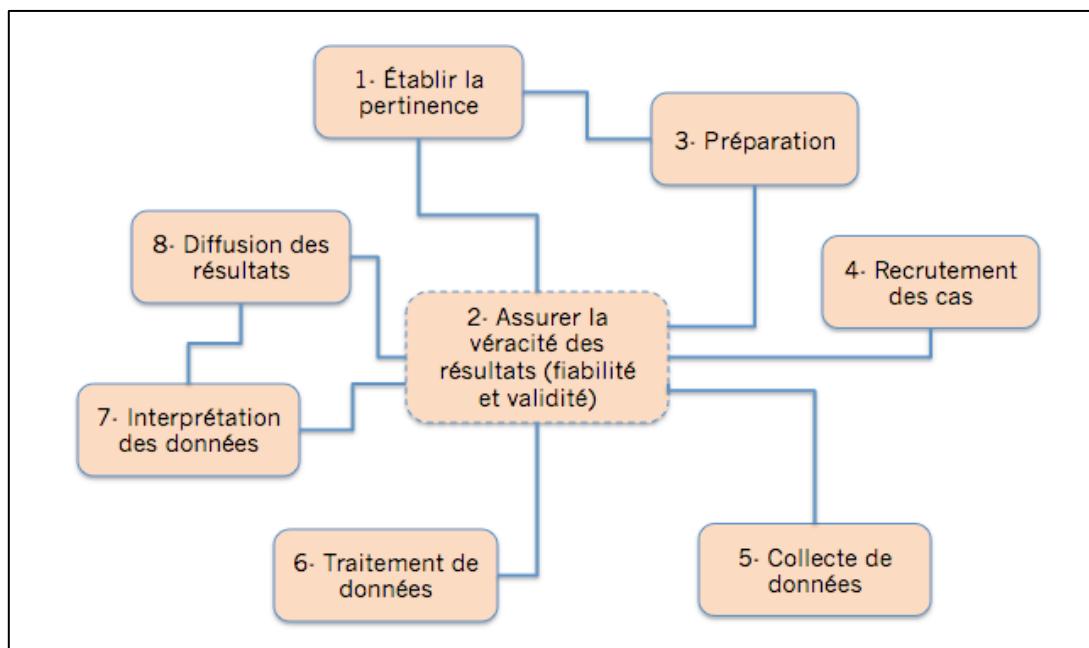


Figure 2.2 Démarche de réalisation de l'étude de cas
Adaptée de Gagnon (2005)

Soulignons qu'il existe de nombreuses similarités entre l'approche de Yin (2009) et celle que nous avons privilégiée. Comme on peut le remarquer, plusieurs de ces étapes se retrouvent également dans la Figure 2.1 qui explique la démarche méthodologique de notre thèse. Ce qui est logique puisque la méthode par étude de cas est le véhicule que nous avons sélectionné pour réaliser notre étude.

En respectant les huit étapes de cette démarche, nous nous assurons de la fiabilité et de la validité de nos résultats. Voici l'objectif recherché pour chacune de ces étapes (Gagnon, 2005):

- ÉTAPE 1: Vérifier que l'étude de cas comme méthode de recherche est pertinente et appropriée;
- ÉTAPE 2: Démontrer que les résultats sont rigoureux, véridiques et conformes à la réalité des cas observés;
- ÉTAPE 3: Avoir un cadre de recherche suffisamment développé et précis pour assurer une collecte rigoureuse des données;
- ÉTAPE 4: Disposer d'un nombre suffisant de cas qui répondent aux critères retenus et permettent de réaliser la recherche en respectant les budgets alloués et le temps prévu;
- ÉTAPE 5: Recueillir, en respectant les règles d'éthique, des données brutes riches et crédibles;
- ÉTAPE 6: Effectuer un examen systématique des données recueillies dans chaque cas et une comparaison symétrique entre les différents cas;
- ÉTAPE 7: Produire des explications théoriques éprouvées et plausibles du phénomène étudié;
- ÉTAPE 8: Contribuer au corpus des connaissances sur le phénomène et en faire profiter les communautés scientifique et professionnelle.

2.3 Cueillette de données

Pour recueillir toutes les informations nécessaires, nous avons préalablement sélectionné les projets devant faire partie de notre étude. Cette étape a été réalisée de concert avec le

directeur, le surintendant en SST, un conseiller en SST ainsi qu'un ingénieur junior en fiabilité mécanique de l'entreprise participative. Ainsi, dix projets d'équipement minier innovants ont été identifiés pour faire partie de notre échantillon. Ces projets sont définis aux chapitre 4 (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a) et chapitre 5 (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014b).

La collecte de données a suivi les étapes chronologiques de la schématisation présentée à la Figure 2.3. Ces différentes étapes et outils sont décrits plus en détails dans les sections qui suivent. Précisons que tout le processus de cueillette de données a fait l'objet d'une validation par les deux comités d'éthique de la recherche de l'École de technologie supérieure (ETS) et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) avant le début de nos actions sur le terrain⁸.

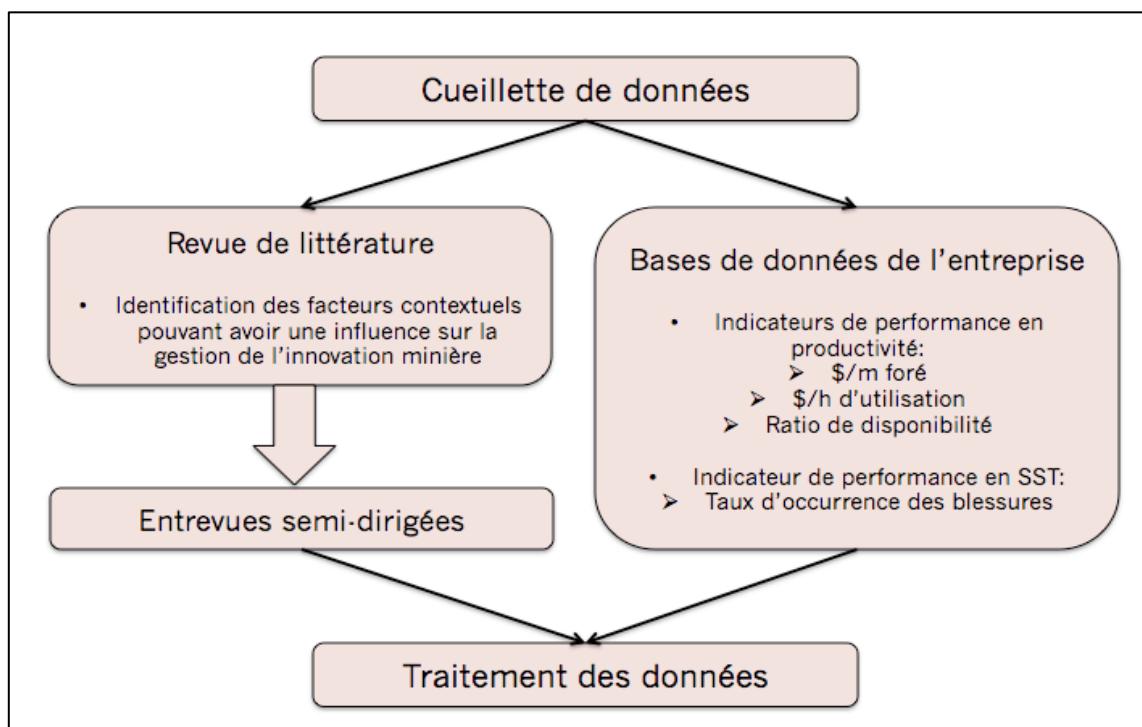


Figure 2.3 Outils de collecte de données
(Étape 4 de la Figure 2.1 et Étape 5 de la Figure 2.2)

⁸ Les certificats d'éthique sont présentés à l'appendice A, alors que les documents qui ont servi à la collecte des données sont présentés à l'appendice B.

2.3.1 Facteurs contextuels en gestion de l'innovation minière

Dans un premier temps, nous avons effectué une revue de la littérature portant sur les facteurs contextuels pouvant avoir une influence sur la performance (en termes de productivité et de SST) associée à l'introduction d'équipement minier innovant. Une fois ces facteurs relevés, il a été possible de réaliser les entrevues semi-dirigées auprès des différents intervenants ayant eu un rôle important à jouer lors de l'introduction de chacun des projets. Ces entrevues ont permis d'évaluer, de façon individuelle pour les dix projets, chacun des facteurs préalablement identifiés dans la revue de littérature. Cette démarche a pour but de fournir la première partie de l'information nécessaire à la deuxième phase de notre recherche, celle qui est explicative (Figure 2.1).

2.3.2 Indicateurs de performance en productivité

Parallèlement à la revue de littérature, le deuxième volet de notre cueillette de données s'est concentré sur les bases de données de l'entreprise. Cette fouille réalisée dans les différentes bases de données de l'entreprise a permis de répondre à notre premier objectif de recherche, à savoir si les innovations technologiques en équipement minier ont permis une amélioration de la performance en productivité et en SST. Pour répondre à ce questionnement, nous avons eu besoin d'indicateurs de performance pour légitimement évaluer la performance en productivité et en SST.

Dans le cas précis de la performance en productivité, nous avons utilisé trois indicateurs différents et complémentaires. Ceux-ci sont:

1. le coût par mètre foré (\$/m);
2. le coût par heure d'utilisation (\$/h);
3. le ratio de disponibilité.

Le choix de ces indicateurs a été discuté et approuvé par l'entreprise participante, en plus d'être reconnu dans le secteur minier (Chadwick, 2008; Horberry *et al.*, 2011). La mesure de ces indicateurs a été prise sur une période de douze mois afin d'éviter les biais pouvant résulter des différences entre les saisons (Dessureault et Doucet, 2003). Nous avons ainsi comparé chacun des projets avec le groupe d'équipement qui était utilisé avant l'arrivée de l'innovation, toujours sur une période de douze mois.

L'indicateur du coût par mètre foré est disponible seulement pour les équipements utilisés pour les opérations de forage, ce qui ne représente que trois projets parmi notre échantillon. Il a été possible de retracer les coûts mensuels historiques (opérations, main-d'oeuvre, maintenance et réparations), de même que le nombre de mètres forés par machine dans les bases de données. Ainsi, nous avons pu établir l'indicateur \$/m en calculant le quotient des coûts totaux par le nombre total de mètres forés au cours des douze mois correspondant.

L'indicateur du coût par heure d'utilisation a pu être établi pour l'ensemble des projets sous étude. Cet indicateur est le résultat du quotient des coûts totaux (opérations, main-d'oeuvre, maintenance et réparations) par le nombre d'heures total que les véhicules du groupe ont été utilisés au cours des douze mois correspondants.

Le ratio de disponibilité a pu être mesuré pour l'ensemble des projets sous étude, à l'exception d'un. Ce dernier étant le projet le plus ancien (implantation en 2005), les données n'étant plus disponibles au moment de la cueillette des données chez l'entreprise. Le ratio de disponibilité est un indicateur de la fiabilité de l'équipement. Ce ratio exprime le pourcentage de temps que l'équipement est disponible à l'utilisation. Son complémentaire correspond donc au pourcentage de temps que l'équipement est en maintenance ou en réparation. À l'instar des deux indicateurs précédents, les mesures ont été effectuées sur la période des douze mois correspondants.

2.3.3 Indicateur de performance en SST

Pour mesurer la performance en SST il existe plusieurs indicateurs possibles (Karmis, 2001). Précisons d'emblée qu'à l'intérieur des calculs d'accidents, les incidents ne sont pas répertoriés. Ces derniers étant des évènements qui auraient pu entraîner des blessures (sans l'avoir fait) (CSST, 2011). Pour notre étude, nous n'avons pas pris en considérations ces incidents puisqu'ils n'ont pas été déclarés ni enregistrés par l'entreprise participante. Il est donc impossible pour nous de les retracer fidèlement. Ultimement, nous avons opté pour le taux de fréquence des blessures (*injury rate (IR)*). Le choix de ce taux est appuyé par une littérature abondante faisant éloge de son utilisation reconnue et universelle (Karmis, 2001; Coleman et Kerkering, 2007; Ural et Demirkol, 2008; *Mine Safety and Health Administration (MSHA)*, 2013). De plus, cet indicateur est préférable au nombre réel de blessures parce qu'il témoigne du nombre de blessures survenues pour un nombre fixe d'employés ou d'heures. Cette façon de procéder permet une comparaison de la performance avec la performance passée avec un certain degré de confiance (Karmis, 2001), ce qui nous intéresse particulièrement pour notre étude. Pour mesurer ce taux de fréquence des blessures, nous devons utiliser la formule suivante :

$$IR = \frac{(nombre de blessures \times 200\,000)}{(nombre d'heures travaillées des employés)} \quad (2.1)$$

En Amérique du Nord nous utilisons 200 000 heures comme base, alors que les Européens utilisent habituellement 100 000 heures. La raison expliquant le choix du 200 000 est parce que cela représente approximativement le nombre d'heures travaillées pour 100 travailleurs au cours d'une année normale (100 travailleurs X 50 semaines X 40 heures). Toutefois, puisque notre recherche porte sur l'impact de l'équipement innovant, le dénominateur de l'équation 2.1 (le nombre d'heures travaillées des employés) correspond au nombre d'heures travaillées des employés spécifiquement sur les équipements de chaque projet. Rappelons à nouveau que nos mesures se font en deux temps. Dans le premier temps, il y a une mesure du taux de fréquence des blessures avant l'arrivée de chacun des projets innovants et dans un deuxième temps, une fois le projet implanté, dans les deux cas sur une base de douze mois.

Pour cet indicateur, deux projets parmi notre échantillon de dix n'ont pas permis la prise de mesures, les bases de données ne permettant pas de retracer fidèlement les blessures associées à ces projets.

Les données provenant de ces quatre indicateurs de performance ($$/m$, $$/h$, ratio de disponibilité et taux de fréquence des blessures) représentent la matière nécessaire pour pouvoir répondre à nos objectifs de recherche. La prochaine section expliquera les différents modes de traitement des données que nous avons privilégiés afin de cheminer à l'intérieur du processus menant à l'obtention des réponses recherchées.

2.4 Modes de traitement des données

Afin de pouvoir interpréter les données recueillies, nous avons suivi les étapes présentées dans la schématisation de la Figure 2.4.

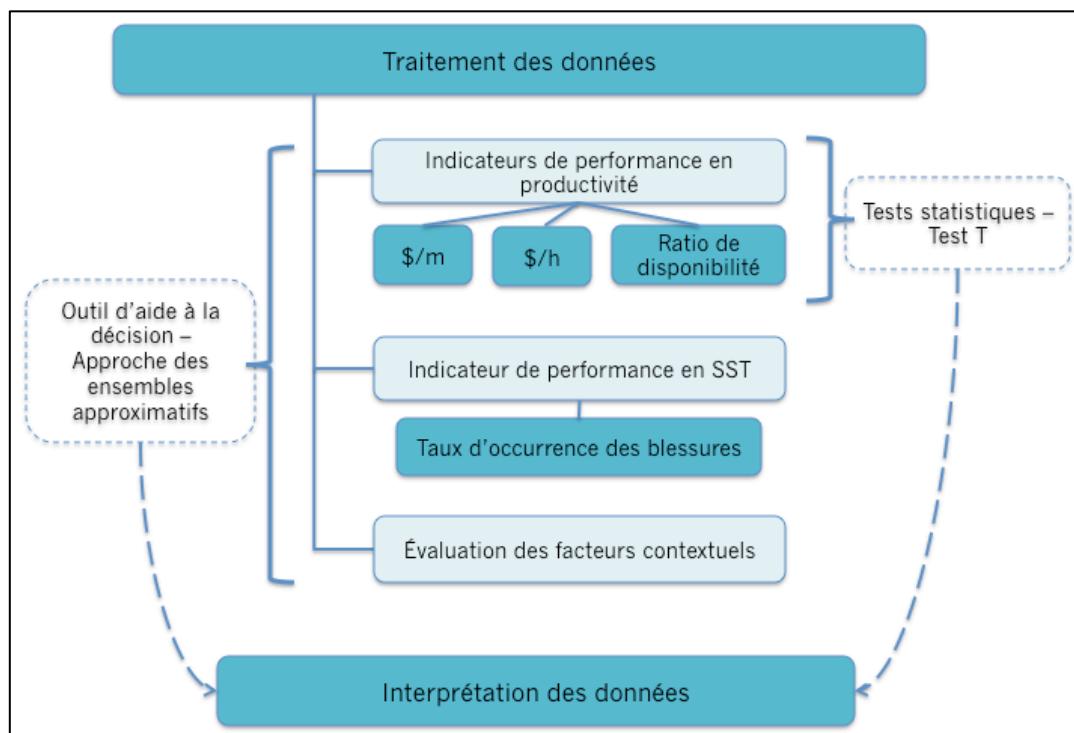


Figure 2.4 Modes de traitement des données
(Étapes 5 et 6 de la Figure 2.1 et Étape 6 de la Figure 2.2)

Nous avons ainsi sélectionné deux modes de traitement des données. Dans un premier temps, il s'agit du test T de Student. Dans un deuxième temps, nous avons utilisé un outil d'aide à la décision appelé l'approche des ensembles approximatifs. Les sections suivantes mettent en lumière la justification du choix entourant ces deux modes de traitement de même que leurs explications et caractéristiques afin de bien comprendre leurs tenants et aboutissants dans le cadre de notre thèse.

2.4.1 Tests statistiques

Afin de répondre au premier élément de notre premier objectif, à savoir si l'innovation a influencé la performance en productivité dans le domaine minier, nous avons opté pour le test d'hypothèse. Le test d'hypothèse est une méthode d'inférence statistique qui permet, entre autres, d'établir s'il y a une différence ou une relation entre des variables (Fortin, 2010). Dans notre cas, cette différence que nous cherchons à confirmer ou infirmer est celle entre la performance du groupe innovant et celle du groupe formé des anciens équipements, et ce, pour chaque projet.

Comme unité statistique, nous avons utilisé la performance mensuelle des projets. Nous avons donc douze observations pour chaque projet par indicateur puisque nous mesurons la performance sur une fenêtre de douze mois. De plus, cette comparaison d'unités statistiques est réalisée entre la performance de deux groupes d'équipements qui sont indépendants (1-innovant; 2-ancien).

Étant donné que les tests sont basés sur des petits échantillons et que ceux-ci sont indépendants, le test d'hypothèse approprié est le test T de Student entre deux échantillons indépendants (Lind *et al.*, 2007).

Les étapes à suivre pour réaliser un test d'hypothèse sont indiquées à la Figure 2.5 de la page suivante.

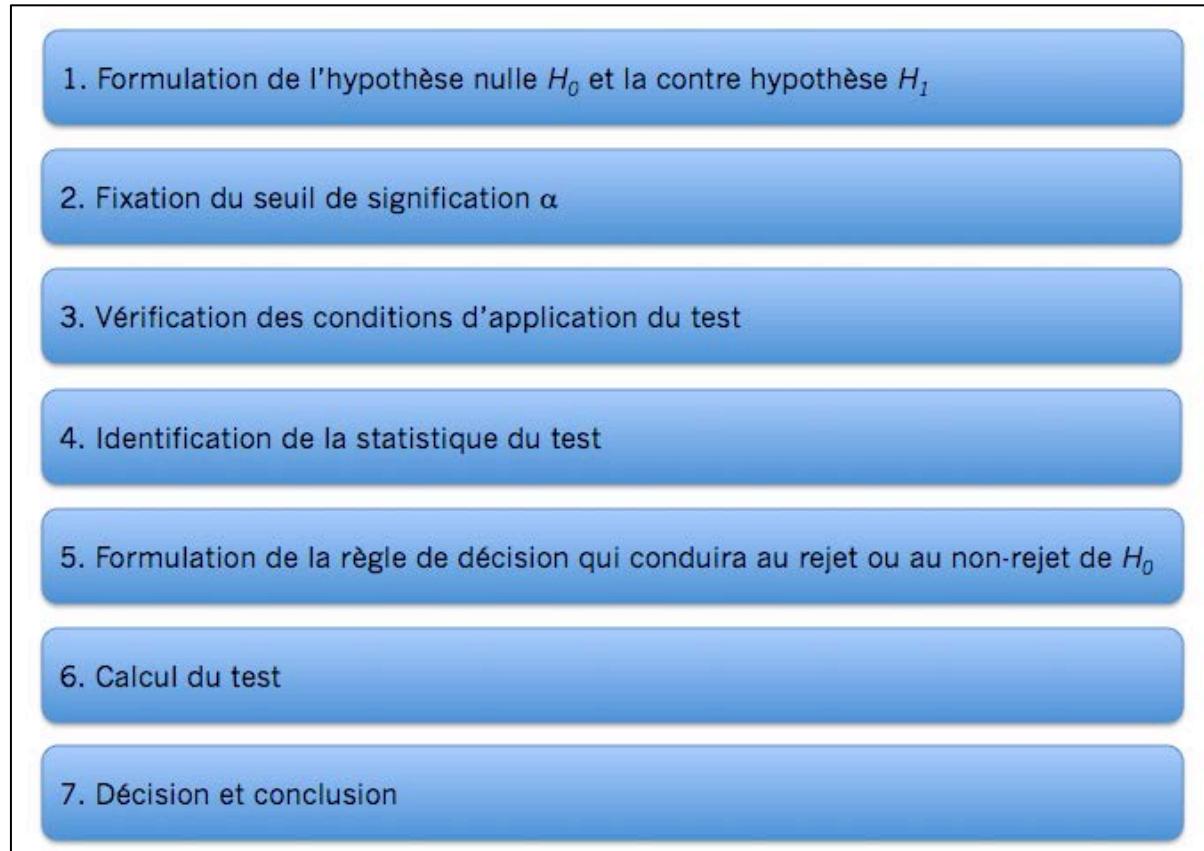


Figure 2.5 Étapes du test d'hypothèse
(Étape 5 de la Figure 2.1)

Dans le cadre de notre recherche, l'étape 1 se traduit par la formulation des hypothèses suivantes:

H_0 = l'équipement innovant n'a pas amélioré significativement la performance sur l'indicateur de productivité étudié (2.2)

H_1 = l'équipement innovant a amélioré significativement la performance sur l'indicateur de productivité étudié

L'utilisation des tests statistiques a été limitée aux trois indicateurs de performance en productivité. Nous n'avons pas utilisé cet outil pour l'indicateur de performance en SST. Pour ce dernier, nous avons plutôt privilégié l'approche descriptive dans le traitement et l'analyse des résultats compte tenu de la sensibilité des données.

Pour l'étape 2 de chacun de nos tests d'hypothèse, nous avons fixé le seuil de signification à 0,05 ($\alpha = 0,05$) tel qu'il est classiquement accepté pour le test statistique (Baillargeon, 2003; Lind *et al.*, 2007; Cucherat, 2009).

À l'étape 3, nous avons deux conditions à vérifier afin de pouvoir utiliser le test T. Dans un premier temps, puisque la taille d'échantillon est petite ($n < 30$), nous devons vérifier si les observations de nos projets sont distribuées normalement. Le test de Shapiro-Wilk permet de vérifier cette condition et il s'avère particulièrement puissant en comparaison des autres tests de normalité avec des petits effectifs ($n \leq 50$) (Rakotomalala, 2011), comme c'est notre cas. La statistique de ce test est la suivante:

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^{\left[\frac{n}{2}\right]} a_i (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) \right]^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

où

- $x_{(i)}$ correspond à la série des données triées;
- $\left[\frac{n}{2}\right]$ est la partie entière du rapport $\frac{n}{2}$;
- a_i sont des constantes générées à partir de la moyenne et de la matrice de variance covariance des quantiles d'un échantillon de taille n suivant la loi normale. Ces constantes sont fournies dans des tables spécifiques.

Les résultats de ces tests sont présentés à l'appendice C⁹. On peut y voir que l'ensemble des 50 distributions a été testé. De ce nombre, 47 sont distribuées normalement (les trois autres apparaissent en noir à l'appendice C et les résultats tirés de ces distributions doivent être interprétés avec précaution).

⁹ Les explications sur l'utilisation de ce test qui permet de vérifier une condition pour l'application du test de Student, dépassent les limites de notre thèse. Toutefois, le lecteur est invité à consulter les nombreux ouvrages traitant du sujet, dont Rakotomalala (2011).

Dans un deuxième temps, pour calculer le test de Student entre deux échantillons indépendants, on doit également déterminer si chacune des paires d'échantillons devant être testées est de variances égales ou non. Car dépendamment de cette égalité ou inégalité, on utilise un test T différent. Pour déterminer s'il y a égalité de variances, on doit effectuer le test de Fisher pour chaque paire de distributions (Lind *et al.*, 2007). La formule pour ce test est celle de l'équation 2.4. L'égalité des variances est rejetée si:

$$F > F_{a/2; n_1-1, n_2-1} \quad \text{ou} \quad F < 1/F_{a/2; n_2-1, n_1-1} \quad (2.4)$$

où

- F correspond à la valeur F lue dans la table de la loi de Fisher pour un risque d'erreur a fixé et $(n_1 - 1, n_2 - 1)$ degrés de liberté;
- a correspond au seuil de signification;
- n_1 est le nombre d'observation dans le premier échantillon;
- n_2 est le nombre d'observation dans le second échantillon.

Pour calculer ce test, nous avons utilisé un seuil de signification de 0,10 ($\alpha = 0,10$) tel que le recommande Lind *et al.* (2007). Les résultats de ces tests sont présentés à l'appendice D.

Ces résultats nous permettent d'identifier la statistique du test que l'on doit utiliser à l'étape 4. Ainsi, dans le cas où les variances sont égales on utilise le test T de la formule 2.5 et dans le cas opposé on utilise celui de la formule 2.7.

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - d_0}{\sqrt{S_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{2}{n_2} \right)}} \quad (2.5)$$

où

- \bar{X}_1 correspond à la moyenne des observations du premier échantillon;
- \bar{X}_2 correspond à la moyenne des observations du second échantillon;
- d_0 correspond à la différence entre les deux moyennes que l'on souhaite tester;
- n_1 est le nombre d'observation dans le premier échantillon;

- n_2 est le nombre d'observation dans le second échantillon;
- S_p^2 correspond à l'estimateur groupé de la variance qui est défini par :

$$S_p^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{(n_1+n_2-2)} \quad (2.6)$$

où

- n_1 est le nombre d'observation dans le premier échantillon;
- n_2 est le nombre d'observation dans le second échantillon;
- S_1^2 est la variance du premier échantillon;
- S_2^2 est la variance du second échantillon.

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - d_0}{\sqrt{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)}} \quad (2.7)$$

où

- \bar{X}_1 correspond à la moyenne des observations du premier échantillon;
- \bar{X}_2 correspond à la moyenne des observations du second échantillon;
- d_0 correspond à la différence entre les deux moyennes que l'on souhaite tester;
- S_1^2 est la variance du premier échantillon;
- S_2^2 est la variance du second échantillon;
- n_1 est le nombre d'observation dans le premier échantillon;
- n_2 est le nombre d'observation dans le second échantillon.

L'étape 5 de nos tests d'hypothèse concerne la règle de décision. Pour nos trois indicateurs de performance en productivité, nous avons la même règle qui est la suivante:

On rejette H_0 , si la *p-value* est inférieure à notre seuil de 0,05, sinon on conserve H_0 .

Donc, en cas de différence observée entre les deux groupes, on conclut à l'existence d'une réelle différence seulement si le risque de se tromper est inférieur à 0,05, c'est-à-dire si la *p-value* (probabilité d'observer une différence au moins aussi importante si en réalité il n'y a pas de différence entre les deux groupes) donnée par le test est inférieure au seuil de 0,05.

L'étape 6 correspond au calcul du test pour chaque comparaison de projets et chaque indicateur de performance en productivité applicable.

Finalement, la septième et dernière étape est la prise de décision pour chaque test. Celle-ci est basée selon le calcul de l'étape 6 et la règle de décision établie à l'étape 5. Avec une *p-value* $\leq 0,05$, la différence est dite statistiquement significative. Cela signifie qu'elle est suffisamment importante par rapport aux fluctuations aléatoires pour que sa probabilité d'être observée en l'absence de réelle différence soit inférieure au seuil de signification de 0,05. Dans ce cas, on rejette H_0 et on accepte H_1 . Dans notre étude, cela veut dire que l'équipement innovant a permis une amélioration significative sur l'indicateur de performance en productivité étudié. À l'inverse, lorsque la *p-value* $> 0,05$, on peut affirmer que la différence n'est pas statistiquement significative. Donc, que la différence n'est pas assez importante par rapport aux fluctuations aléatoires pour pouvoir raisonnablement exclure qu'elle soit due au hasard (Cucherat, 2009). Pour notre recherche, cela veut dire que l'on doit conserver H_0 , donc que l'équipement innovant n'a pas permis une amélioration significative sur l'indicateur de performance en productivité étudié.

2.4.2 Approche des ensembles approximatifs

Puisque le deuxième objectif de notre thèse est de mieux comprendre les relations entre l'innovation et la performance en productivité ainsi qu'en santé et sécurité du travail, l'examen des causes en jeu devient un incontournable. Face à une telle problématique, la technique d'extraction de règles est relativement avantageuse parce qu'elle permet d'induire un grand nombre d'attributs influents (Wang *et al.*, 2010). La technique d'extraction de règles de décision que nous avons sélectionnée pour notre étude est celle des ensembles

approximatifs (rough set theory), car elle mène à la création de règles liant les variables dépendantes à la variable indépendante, et c'est exactement ce que nous recherchons. De plus, cette méthode est plus appropriée que les méthodes statistiques conventionnelles lorsque les tailles de données empiriques ou expérimentales sont petites (Pawlak, 1991). Ce qui est le cas avec l'échantillonnage de notre étude.

Cette technique d'aide à la décision nous vient initialement de Zdzislaw Pawlak (1982). À ces débuts, cet outil d'intelligence artificielle permettait l'exploration de bases de données (*Data mining*) afin d'y extraire des connaissances, entre autres, en analyse des systèmes d'informations. L'avantage d'une telle approche repose sur le fait qu'elle ne compte pas sur d'autres paramètres ni sur des suppositions de modèles antérieures. Cette approche est reconnue pour sa dépendance aux données originales, pour sa structuration raisonnée selon des règles latentes, pour les comparaisons contrôlées et le raisonnement à base de similitude. Selon Pawlak *et al.* (1995), la méthode des ensembles approximatifs est une méthode très utile pour réduire les attributs à ceux qui sont essentiels, à la découverte de dépendances entre attributs, à l'évaluation des attributs significatifs, à la génération d'algorithmes de décision des objets, à la classification approximative des objets, à la découverte de ressemblances ou de différences des objets, à la découverte de tendances ainsi qu'à la découverte de relations de cause à effet. Ceci étant dit, la méthode des ensembles approximatifs fournit une façon utile et efficace, d'extraire, d'induire, de classifier et de découvrir des informations cachées, basées sur des données empiriques à grande échelle. De plus, cette méthode permet le traitement d'attributs de différentes natures, soit quantitative ou encore qualitative (Zaras, 2004). Comparativement à d'autres approches visant le traitement d'informations contradictoires ou incohérentes, l'utilisation de cette méthode comporte beaucoup d'avantages (Pawlak, 1996; Pawlak, 1997). En 1994, Pawlak et Slowinski (1994) ont proposé l'application de l'approche des ensembles approximatifs pour des problèmes multiattributs¹⁰. L'une des difficultés d'application de l'approche multiattribut en pratique est

¹⁰ Le lecteur est invité à consulter l'annexe V afin d'en apprendre davantage sur le sujet de l'analyse multiattribut.

la détermination des poids des attributs. L'un des avantages de l'application des ensembles approximatifs en problème multiattribut se situe à ce niveau puisque cette méthode n'exige pas d'informations sur le poids d'importance des attributs.

Poursuivant et prolongeant les études de Pawlak, Greco *et al.* (2001) ont amélioré l'approche de leur prédecesseur en l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance (EABD) (*dominance-based rough set approach (DRSA)*). La nouvelle version de ces auteurs permet de modéliser les préférences en cas d'inconsistance des données ou avec de l'information incomplète (Szelag, 2010). Un tel outil servant à résoudre des problèmes multiattributs peut être utilisé dans de multiples champs de recherche : finances, médecine, géologie, pharmacologie et plusieurs autres (Chakhar et Saad, 2012).

Le changement principal apporté par Greco *et al.* (2001) comparativement aux ensembles approximatifs classiques de Pawlak (1982) est la substitution de la relation d'indiscernabilité par une relation de dominance, laquelle permet l'approximation des préférences d'un (ou des) expert(s). Une conséquence importante de ce fait est la possibilité de déduction, à partir de décisions exemplaires, du modèle de préférence en termes de règles de décision sous forme de déclarations logiques du type "si ..., alors...". Par exemple, si nous avons telle(s) condition(s), alors nous devrions obtenir tel(s) résultat(s). Ce type de règles de décision permet donc d'identifier les attributs les plus pertinents, mais également les seuils critiques de ces attributs afin d'expliquer les résultats des objets d'étude.

2.4.2.1 Étapes de l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance

Dans l'optique de bien comprendre la mécanique d'application de l'approche EABD aux problèmes multiattributs d'aide à la décision, nous présentons ici-bas un descriptif méthodologique des étapes à suivre :

- ÉTAPE 1: Identification et définition minutieuse des attributs conditionnels et des attributs décisionnels. Les attributs conditionnels, dans notre thèse, ce sont les

facteurs contextuels que nous avons identifié au travers la revue de littérature sur le sujet (chapitre III). Les attributs décisionnels permettent de catégoriser les objets. Généralement trois ou quatre catégories sont utilisées (Kane *et al.*, 2009). Pour notre recherche, ces catégories sont établies en fonction des niveaux de performance des projets sur chacun des indicateurs mesurés (\$/m, \$/h, ratio de disponibilité et taux d'occurrence des blessures).

- ÉTAPE 2: Sélection des objets d'étude qui sont représentatifs de la population que l'on souhaite étudier. Ici, il s'agit de nos dix projets d'innovation en équipement minier. Le choix de ces projets est discuté à la section 6.2.
- ÉTAPE 3: Les objets d'étude de l'échantillon doivent être triés (problématique de tri β (Roy, 1985)) par catégories en respect de l'attribut décisionnel (indicateur de performance). Ce tri peut être réalisé de deux façons : soit de façon subjective par les experts ou soit de façon objective selon des mesures quantitatives. Nous avons privilégié la deuxième façon principalement à cause de son objectivité. Les mesures quantitatives sont les mesures obtenues sur les différents indicateurs de performance. Donc, à cette étape chaque projet d'innovation est ainsi catégorisé par rapport à sa performance sur chaque indicateur de performance.
- ÉTAPE 4: Dans cette quatrième étape, on évalue chaque projet en regard et respect de chacun des attributs conditionnels sur lesquels on souhaite faire l'évaluation. Pour chaque attribut conditionnel, il doit y avoir une échelle de performance pour y mesurer chaque projet. Il s'agit donc d'évaluer chaque projet par rapport aux facteurs contextuels identifiés lors de l'étape 1.
- ÉTAPE 5: La dernière étape est celle de l'extraction des règles de décision à l'aide d'un logiciel informatique. Il existe peu de logiciels aussi spécialisés (dans les calculs de relation de dominance) pouvant réaliser ce type d'extraction mathématique. Le

premier fut le support logiciel 4eMka2. Ce dernier a depuis été remplacé par le logiciel jMAF (Blaszczyński *et al.*, 2013) que nous avons sélectionné¹¹.

Dans le cadre de notre thèse, ce qui nous intéresse ce sont les règles de décision afin de répondre à notre deuxième objectif en identifiant les facteurs contextuels menant à une implantation d'innovation réussie en termes de performance en productivité ainsi qu'en SST. Ces règles de décision identifient les attributs conditionnels (dans notre cas il s'agit des facteurs contextuels) les plus pertinents, de même que leurs seuils minimaux afin d'obtenir telle catégorie de performance sur tel attribut décisionnel (dans notre cas il s'agit de nos indicateurs de performance). Ainsi, ce que nous pouvons obtenir comme règle de décision c'est, par exemple « si tel facteur contextuel est d'au moins tel niveau, donc telle catégorie de performance sur l'indicateur \$/h devrait être atteinte ». Peu importe que le lien d'interaction entre ces variables soit positif ou négatif, les règles de décision sont en mesure de le préciser.

En définitive, nous pouvons dresser un portrait des avantages des règles de décision. Tel que le souligne Szelag (2010), les principaux avantages de ces règles sont :

- Forme compréhensible de représentation de connaissances;
 - Peut représenter n'importe quelle fonction (plus général que des fonctions d'utilité ou des relations binaires);
 - S'attarde uniquement au sous-ensemble d'attributs les plus pertinents selon le point de vue du preneur de décision (*decision maker*, (DM));
 - N'exige pas d'opérateurs d'agrégation;
 - Supporte le *backtracking* (retour sur trace)¹²;
 - Peut expliquer les décisions du passé et prévoir celles du futur.
-

¹¹ Ces deux outils ont été développés et conçus par le *Laboratory of Intelligent Decision Support System* (LIDSS) à l'*Institute of Computing Science*, qui se trouve à la *Poznan University of Technology*.

¹² Le *backtracking* est lorsque l'on revient légèrement en arrière sur des décisions prises afin de sortir d'un blocage. Un exemple simple est la méthode des essais et erreurs.

Toutefois, comme nous le rappelle Guibert et Jumel (1997), il ne faut pas oublier que les traitements statistiques que nous utilisons ne sont que des outils qui permettent de “voir”, dans une masse d’informations très large, des tendances, des regroupements, des similitudes ou encore des oppositions. Le traitement de données n’est donc pas une fin en soi et ne doit pas être perçu comme l’aboutissement du processus de recherche, mais plutôt comme une aide pour l’interprétation des données recueillies. Cette interprétation des résultats constitue la dernière étape de notre processus de recherche (Étape 7 des Figures 2.1 et 2.2).

2.5 Structure de la thèse

La présente thèse est composée de six chapitres dont celui-ci, couvrant la méthodologie et le premier chapitre portant sur la problématique et les objectifs de notre recherche. Les quatre chapitres suivants sont représentés par les différents articles qui ont été publiés, acceptés ou soumis à des revues scientifiques avec comité de pairs. Ces quatre chapitres détailleront nos résultats de recherche. La structuration de ces chapitres est illustrée à la Figure 2.6. Notons que cette structure est fidèle à la démarche méthodologique que nous avons sélectionnée et discutée dans la section 2.1.

Dans le chapitre 3 (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014c), nous y présentons la revue de littérature portant sur les facteurs contextuels pouvant avoir une influence sur la réussite d'une implantation d'innovation en équipement minier. Cet état de l'art a ainsi permis d'identifier dix-neuf facteurs qui sont susceptibles d'avoir un effet de levier lors de l'introduction d'équipements miniers innovants. Ce travail a également confirmé les lacunes sur l'importance relative de ces différents facteurs de même que sur leurs interactions. Finalement, cette recherche de facteurs est le préambule nécessaire pour la deuxième phase de notre recherche permettant de répondre au deuxième objectif de notre recherche (chapitre 6, Boudreau-Trudel *et al.*, 2014d).

Le chapitre 4 (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a) introduit les premiers éléments de réponse à notre premier objectif, à savoir si l'innovation en équipement minier a permis une

amélioration de la productivité. Ce chapitre présente ainsi les résultats obtenus sur les trois indicateurs de performance en productivité pour notre échantillon de dix projets d'innovation. Nous y présentons les résultats sous une forme descriptive avant d'y présenter les résultats obtenus à l'aide du test T de Student. Ce dernier nous permet ainsi d'affirmer ou d'infirmer si chacun de ces projets a permis une amélioration significative sur chaque indicateur de performance étudié.

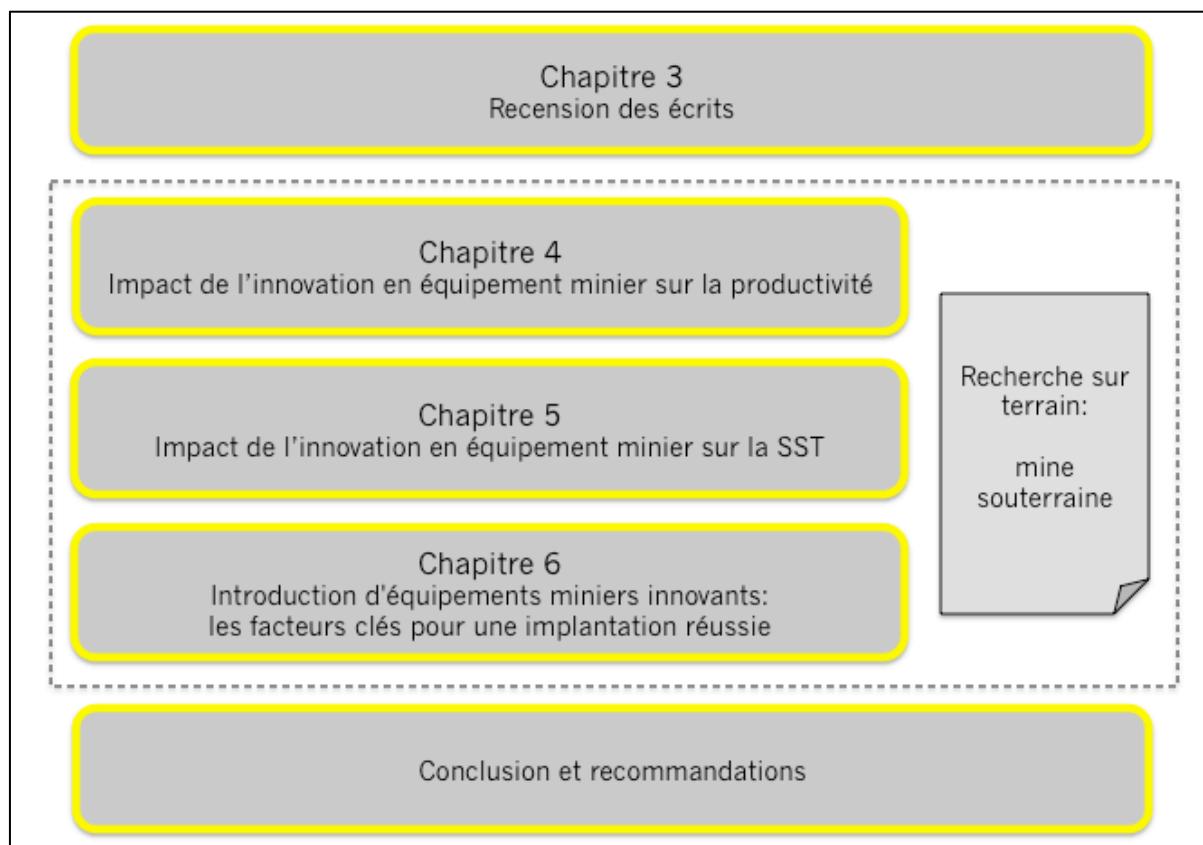


Figure 2.6 Structure des chapitres suivants de la thèse

Au chapitre 5 (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014b) nous continuons et concluons la réponse de notre premier objectif en présentant les résultats de l'impact de l'innovation en équipement minier sur la performance en SST. Parallèlement à cet exercice, il a été possible de soulever plusieurs éléments problématiques dans la conception des nouveaux véhicules miniers. Ce

chapitre 5 clôt la phase exploratoire de notre recherche, telle que présentée dans la Figure 2.1.

La deuxième phase de notre étude, c'est-à-dire la recherche explicative est concentrée dans le chapitre 6 (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014d). Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus à la suite de l'utilisation de l'approche EABD. Cet outil d'aide à la décision a permis de confronter les résultats de performance mesurés pour chaque projet (chapitre 4, Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a et chapitre 5, Boudreau-Trudel *et al.*, 2014b) en regard de l'évaluation des facteurs contextuels (identifiés au chapitre 3, Boudreau-Trudel *et al.*, 2014c) pour chacun d'entre eux. À la suite de cette association sous forme de table de décision, nous présentons les règles de décision qui ont pu être induites à l'aide de cette approche. Ces règles précisent les facteurs clés ainsi que leurs seuils à atteindre pour une implantation réussie d'équipements miniers innovants (selon les indicateurs de performance sélectionnés).

Finalement, nous concluons avec le bilan et les contributions de nos travaux, avant de préciser les limites et les pistes de recherches potentielles découlant des résultats de cette thèse.

CHAPITRE 3

ARTICLE 1: MANAGING EQUIPMENT INNOVATIONS IN MINING: A REVIEW

Bryan Boudreau-Trudel¹, Sylvie Nadeau¹, Kazimierz Zaras², Isabelle Deschamps³

¹Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, H3C 1K3, Canada

²Department of Management, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 Boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, J9X 5E4, Canada

³Department of Mathematics and Industrial Engineering, École Polytechnique de Montréal, 2900 Boul. Edouard-Montpetit, Montréal, H3T 1J4, Canada.

WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation - Special Issue "Occupational Ergonomics and Safety", Accepted (WORK - 031).

Abstract

Technological innovations in mining equipment have led to increased productivity and occupational health and safety (OHS) performance, but their introduction also brings new risks for workers. The aim of this study is to provide support for mining industry managers who are required to reconcile equipment choices with OHS and productivity. The method used is an examination of the literature through interdisciplinary digital databases. Databases were searched using specific combinations of keywords and limited to studies dating back no farther than 1992. The “snowball” technique was also used to examining the references listed in research articles initially identified with the databases. A total of 19 contextual factors were identified as having the potential to influence the OHS and productivity leverage of equipment innovations. The most often cited among these factors are the level of training provided to the equipment operators, operator experience and age, supervisor leadership abilities, and maintaining good relations within work crews. But the interactions between these factors are not discussed in mining innovation literature. It would be helpful to use a

systems thinking approach which incorporates interaction between relevant actors and factors in order to define properly the most sensitive aspects of innovation management as it applies to mining equipment.

3.1 Introduction

In spite of the widespread perception that the mining industry is slow to adopt new technologies (Tilton, 2003), this primary sector has undergone major changes over the past few decades (Blank *et al.*, 1996; Bartos, 2007). This is the case for mineral extraction operations in particular. The mechanical devices now used represent significant improvements. These include jumbo drills, which have replaced much of the manual drilling, and increased truck loading capacity for hauling ore (Rendu *et al.*, 2006). Motivation for the adoption of innovations in this industry has been based primarily on the pursuit of two main goals, namely increased productivity and improved working conditions for mine workers.

However, this two-fold challenge bears a rather strong interdependency. Numerous studies have shown that introducing mining equipment based on new technologies also introduces new risk factors for mine workers (Eger *et al.*, 2004; Kumar, 2004; Eger *et al.*, 2006; Coleman and Kerkering, 2007; Kecojevic *et al.*, 2007; Uarl and Demirkol, 2008; Dhillon, 2009; Ouellet *et al.*, 2011; Smets *et al.*, 2010). It is clear that in order to gain the leverage provided by innovation in terms of both productivity and occupational health and safety (OHS), innovation management becomes crucial. The present study is focused on this management and more specifically on the factors that influence the success of implementing equipment innovations underground. The aim of this study is therefore to provide support for mining industry managers who are required to reconcile equipment choices with OHS and productivity. With that objective, an approach that fosters systems thinking is particularly useful to understand the structures that influence such implementation of innovation (Lampela and Kärkkäinen, 2008; Kapsali, 2011). For that reason, a systems thinking approach has been used to summarize the findings.

3.2 Methodology

In order to identify the innovation management practices that are the most influential, a review of the literature has been conducted. The goal of this review was to determine whether or not there are common factors and specific interactions between relevant factors or actors that have contributed to the productivity and OHS performance leverage afforded by innovation. Therefore, the review focused on multidisciplinary studies since innovation in the field of mining equipment touches several components and disciplines, including ergonomics, mechanical engineering, mine engineering and OHS as well as innovation management and finance.

In taking stock of the current state of the knowledge, the present research focused on two categories of contextual factors, namely those that have led to accidents associated with equipment used in mining, and those that influence productivity when new equipment is being introduced. The research methodology consisted of the following steps:

- Firstly, by identifying interdisciplinary digital databases, namely Scopus and ScienceDirect. Both of these were among the largest currently available. Scopus alone covers more than 18,500 peer-reviewed journals in various disciplines, in particular social and technical sciences.
- The databases were searched using the following combinations of keywords: "mining innovation", "mine innovation", "mining safety", "mine safety", "mining productivity", "mine productivity", "mining accidents", "mine accidents", "mining equipment", "mine equipment", "system thinking mining", "system thinking mine", and "system thinking innovation".
- In order to focus on the most relevant research, only articles that contained the keywords in the title were kept, in addition to sorting the search results on the basis of relevance.
- The abstracts of the articles thus identified were read and if the research criteria were satisfied at this point, the entire article was examined.

- Studies focused exclusively on coal mines were not included among the selected articles, since the particularities of this type of mine raises issues that are beyond the scope of the present study. The study by Paul and Maiti (2007) of the role of behavioural factors in safety management in two Indian coal mines was therefore not included. However, studies that considered coal mines and other types of mines (metal, non-metal) were examined.
- Since the goal was to obtain a current view, the review has been limited to studies dating back no farther than 1992. Studies conducted over 20 years ago were not considered sufficiently connected to current reality, innovation being an ongoing activity that changes practices.
- Finally, in order to make the nomenclature used in the literature search more exhaustive, the “snowball” technique was also used in addition to examining the references listed in the initially selected research articles.

3.3 Results

The results of the research are presented in Tables 3.1 and 3.2. Table 3.1 describes the research goal, the subject of study, the methodology and the common factors identified for each selected study published in a peer-reviewed journal, based on the methodology. The results of these studies constitute the bulk of the contents of the present section.

Firstly, it is important to note that the majority of recent studies in mining innovation used a traditional analytical thinking where analysis breaks the whole into parts instead of combining the parts into a whole as done with a systemic approach, like systems thinking. As stated by Atun (2012) systems thinking considers the structure, patterns of interaction, events and organizational dynamics as components of larger structures helping to anticipate rather than react to events, and to better prepare for upcoming challenges. Unfortunately, like Lampela and Kärkkäinen (2008), the present literature review revealed very few papers discussing particularly the interconnection between relevant components in the management of innovation.

Blank *et al.* (1996) analyzed the relationship between technological development and workplace accidents in Swedish mines from 1911 to 1990. Based on secondary data and regression analysis, they drew the conclusion that the impact of technological changes such as mechanization and automation was a very significant factor in the variation in the annual incidence of fatal accidents, but that there were other key factors that also warranted study. Among these were the type of remuneration, safety systems and safety measures. Although suggested by the authors, these factors remain vague since no definition was elaborated.

Based on a review of the literature, Dhillon (2009) summarized the various aspects of the safety of mining equipment, including a list of human factors to take into consideration when designing or choosing equipment in order to reduce the risk of accidents and work-related illness. This list was derived essentially from the definitions proposed in a study by Unger (1996). Among others, the authors identified the quality of the workspace. This quality comprises several elements, in particular 1) worker body types included between the 5th and 95th percentile; 2) controls of the same type as on other equipment; 3) sharing of the workload between the hands and feet; 4) the quality of the seat (meaning designed to protect against shock from bumpy roads or minor collisions, easily repaired and replaceable, adjustable to body dimension, providing support, distributing weight and relieving pressure points, not impeding entrance to or exit from the vehicle and not interfering with operator control manoeuvres); 5) the quality of the view (an unobstructed view of everything the operator needs to see, and adequate contrast between the object or location of interest and the surrounding environment), and 6) proper indication of hazards and emergency actions. Dhillon (2009) also noted that given the increasing power and complexity of the equipment, the operator must be properly trained and highly apt in order to work safely, although these two influential factors were not defined.

Eger *et al.* (2004) examined specifically the factors that hinder the vision of operators of loader-transporters in mines in the Canadian province of Ontario. Based on 130 questionnaires completed by operators with at least one year of experience, the principal factors hindering vision are dust, fog, escarpments, dim lighting, over-bright lighting,

distracting noises and vibrations. The main recommendations of the operators for improving vision are improving seat adjustability, installing adjustable lighting supports, installing smaller but stronger lighting, and increasing contrast between hazardous elements and the work zone. An interesting observation noted in this study was that a considerable portion (one third) of the workers surveyed said that vision problems are not raised during training or safety meetings. This reveals a deficiency in operator training and the main reason for the present study, namely to help managers of innovation by shedding light on the factors that influence OHS and productivity performance.

Groves *et al.* (2007) characterized mining equipment related accidents occurring in the USA from the years 1995 to 2004. Using MSHA (Mine Safety and Health Administration) and CPS (Current population survey) databases, these researchers listed 190,940 cases of accident or work-related illness, of which nearly half (49 %) involved mining equipment. In addition to determining the types of equipment that were most frequently involved in the accidents (fatal or not), the study revealed a negative relationship between age and risk of accident. Over 50 % of these accidents involved workers with less than five years of experience.

The importance of experience in the mining sector was also noted in a study conducted by Kecojevic *et al.* (2007), who used MSHA databases to characterize the causes of deaths involving mining equipment in the USA from 1995 to 2005. The conclusion drawn from the 483 fatal accidents listed supports the findings of Groves *et al.* (2007), namely that mineworker experience is a key factor. Mine workers with less than five years of experience accounted for 44 % of these deaths. The study by Kecojevic *et al.* (2007) also identified other significant factors contributing to accidents, including inadequate training and tunnel roadways that are poorly conceived, poorly designed and in poor condition. The authors suggest approaches to accident prevention to consider where mining equipment is involved, including identification and monitoring of hazards, raising operator skill to an acceptable level, mentoring inexperienced workers and training them using computer-assisted

simulation, regular evaluation of training programs, and placing a competent person in charge of operations involving the equipment.

Lynas and Horberry (2011) have provided a review of the literature on the impact of human factors on automation in the mining sector. The authors suggest that implementing automation requires strong and resilient leadership on the part of managers as well as development of their aptitudes in the management of change. In addition, this research identifies acceptance by workers, design respecting human factors, integration of multiple warning systems and alarms, operator training and operator dependence on new technology as the principal problems and challenges associated with the implementation of new mining equipment.

Patterson and Shappell (2010) analyzed 508 cases of accidents and incidents recorded between 2004 and 2008 in the Australian state of Queensland. The aim of this study was to identify human factor trends and system deficiencies in the mining sector. Secondary data from case reports were examined, followed by codifying of these reports by experts using HFACS-MI (Human Factors Analysis and Classification System Mining Industry), which is based on the human factor classification and analysis system developed by Reason (1990) in his "Swiss Cheese Model", based on the typology proposed initially by Rasmussen (1982). Skill-based errors were thus identified as the most frequent cause of unsafe operator actions (58.9 %). These errors included inadvertent or omitted operations, technical errors, and errors in the use of personal protection equipment, devices or tools. A lack of leadership in matters of safety was also identified as a factor contributing to accidents and incidents (36.6 %). Other factors such as poor communication within work crews and problems with the physical and technical environment were cited among the conditions predisposing workers to perform unsafe actions. But these other factors are always identified as distinct factors instead of being seen as interconnected components.

Ruff *et al.* (2011) studied 562 cases of serious accidents (causing death or permanent disability) in the mining sector in the USA from 2000 to 2007. The goal of this study was to

gain better understanding of the factors that contribute specifically to accidents involving mining equipment. The factors in common thus identified were, among others, operator hindered vision, worker desensitization to alarms, difficulty pinpointing alarm location and priority, fatigue and driving speed. The research priorities suggested by the authors, based on their findings, are the improvement of operator vision and training, improvement of cabin design and establishment of close partnerships between the mining industry, equipment manufacturers, safety organizations, legislators and research organizations.

A study conducted by Ural and Demirkol (2008) examined 68 fatal accidents in mines in Turkey in 2004. The principal goal of this study was to compare the safety performance of the Turkish mining sector with that of other countries. By secondary data analysis, it was thus demonstrated that workers below the age of 25 were at higher risk of accident than were older workers and were involved in 41 % of accidents. The researchers' recommendations emphasize increased training for young workers and assigning workers with more experience to the more critical tasks.

Other studies not focused specifically on the integration of new mining equipment but examining related subjects and identifying interesting elements are listed in Table 3.2. These contain research results other than those published in peer-reviewed journals. One is a thesis, one is an exploratory study and two are monographs.

The aim of the doctoral thesis of Beaupré (2011) was to improve understanding of how miners in the Abitibi-Témiscamingue region of the Canadian province of Québec perceive the risks inherent in their trade and how they react to these. Based on 20 semi-directed interviews and on observations, the results indicate that miners establish a direct link between production bonuses and underground risks (confirmed by 20 of 20 participants). Furthermore, only four of the 20 stated that experience in underground mines facilitates the detection of risks. This study also yielded some advice from the participants regarding means of decreasing underground risks. Particularly noteworthy among these are increased OHS

training (9/20), less pressure to increase efficiency (8/20), better communication between workers (partners and workers on the next shift) and foremen (5/20).

The monograph of Dupuis (2002), with specific reference to strategies used by miners in Abitibi-Témiscamingue to deal with fear, hazards and the risks inherent in their trade, shows the importance of good relations within work crews. The author states that these relations are even the principal factor ensuring the safety of underground mining. Working with a person or persons with whom one has difficult relations, characterized by distrust or lack of confidence represents a risk, indeed a danger with regard to workplace safety. Furthermore, crew productivity can only improve when interpersonal relations do so.

Karmis (2001) is one of few who use a systems thinking method to illustrate his concept. The author presents a fundamental model of occupational health and safety management in the mining industry, explaining first that good OHS management in underground context must take into consideration three major interrelated aspects, each of which will assume a proportion that reflects the unique characteristics of the organisation (see Table 3.2). These major aspects are personnel (including age, experience, skills, motivation, etc.), systems (the design of the mine, ergonomics, human factors, etc.), and the environment (work crew, training, identification of risks, OHS personnel, supervision, etc.). Since each individual is unique, designing a system that motivates all labourers is not an easy task. In fact, this is one of the greatest challenges facing mining companies (Karmis, 2001). The root cause of the difficulty is that a given approach typically inspires some individuals while representing no real interest to others. The author argues that the keys to rallying the entire staff and labour around an organizational vision that does not tolerate the risk of injury are creativity and the development of a range of systems in order to make all employees feel directly concerned. Leadership thus plays a preponderant role.

Examining the conditions under which new workers are integrated in the mining sector, the conclusion of the case-study-based exploratory research of Ouellet *et al.* (2011) states

categorically that experience and age are key factors involved in determining the risk of accidents in this industry.

The present review of the literature reveals a lack of consensus among authors regarding the relative importance of the various factors identified as contributors to the risk of sustaining a work-related injury in underground mines. It would therefore be difficult at this stage to use it as the basis for setting OHS-related priorities.

Figure 3.1 illustrates the principal contribution of the present research in the form of a summary of the state of the art with regard to the consideration of contextual factors in innovation management when introducing novel mining equipment. The review has identified 19 factors that appear to affect the leverage to be expected from innovation in the realms of OHS and productivity.

The circle on the left in Figure 3.1 contains the contextual factors associated with OHS, while the circle on the right contains those associated with productivity. The circle in the middle shows the human factors that could have an influence on both OHS and productivity. The areas of overlap indicate that the factors affect interlocking dimensions. For example, the integration of multiple warning systems or alarms could influence OHS performance, an influence that is also a product of human factors (e.g. operator visual and auditory capacities), while work crew productivity would not be influenced.

From a systems thinking perspective, management of equipment innovations in mining is influenced by human, physical, social and financial factors. These influences, like in other domains, do not occur one at a time, but continuously change and affect each other, which create a complex network of interactions and communication (Naaldenberg *et al.*, 2009). That list of factors should not be seen as isolated factors, but should be viewed as interrelated and interdependent parts of a whole. For example, when the price of precious metals increases, there are more mines in operation, which creates a shortage of manpower, especially among the operators. Thus, the mines employ operators with less experience and

they also offer better wages in order to obtain sufficient staff. However, this creates a high turnover rate, which is not an ideal environment for a work crew atmosphere. We can understand in this example that factors found in literature are interrelated and interdependent even if most of the authors are not discussing that fact.

To support the use of a systems thinking approach for the management of mining innovation we could report to other fields of research where this type of approach has been successful. For example, the Klein and Sorra's (1996) innovation implementation model, which offers a holistic theoretical perspective, has shown strong potential on information system implementation (Dong *et al.*, 2008). As well as the McAdam and Moffett (2010) innovation implementation model for SMEs in which authors demonstrated the empirical relationships among leadership, people and culture, total quality management and continuous improvement, product and process, and knowledge and information management.

3.4 Discussion

This study of the state of the art in innovation management in mining reveals a rich list of contextual factors to take into consideration when introducing new equipment. However, these factors remain somewhat vague. For example, if supervisor experience is a major factor (Karmis, 2001; Kekojevic *et al.*, 2007), does this mean experience as an underground miner or experience as a supervisor? The notion of operator dependence on technology (Lynas and Horberry, 2011)) is proposed as a concept and then left entirely to our imagination. Under what conditions does such dependence develop and what exactly are its consequences?

As far as the present review has been able to determine, the relative contributions of these factors to risk or success have not yet been evaluated and weighted. No author has ventured to identify any factor as pre-eminent. Although this is expected to be difficult given the complexity of the idea and the distinct environments, it would be helpful to focus on compensatory effects between certain factors. Always with a systems thinking perspective where factors are interconnected, here are a few examples to illustrate what we mean. 1- Can

exhaustive identification of risks and associated emergency measures combined with advanced training compensate for a lack of experience? 2- Does supervisor leadership ability compensate for inexperience? 3- Does involvement of operators in the design of equipment compensate for non-standardization with respect to other equipment? In order to define the importance of these factors, it would be useful to determine their critical thresholds. Such an approach would allow the definition of the most sensitive aspects of the management of innovation in the realm of mining equipment.

It should also be noted that innovations require interactions among actors instead of individuals alone. And when these actors have different values and different reasons to be part of the system, they may often have different individual goals (Naaldenberg *et al.*, 2009). This is the case in mining innovation, where the manufacturer wants to sell its equipment (of a million dollars), the mine supervisor wants no accident and the operator wants to spend less time on maintenance in order to have more time to reach his productivity bonus. This fact highlights the need to embrace high collaboration across all these actors to ensure that the main goal of organization, which should be higher OHS and productivity performance, is not overpassed by individual goals.

The principal limitation of the presented model stems from its construction based on studies conducted in mines in developed nations (Sweden, Canada, USA, Australia and Turkey). These nations have higher regulatory standards and sensitization to worker health and safety than do most developing nations, such as for example Chile, China or India (Baram, 2009). Some of the contextual factors listed might be different if studies conducted in these countries had been taken into consideration. The existing studies focus primarily on coal mines, as is the case for the research conducted by Paul and Maiti (2007) in India or that of Wu (2010) in China. The particular characteristics of this type of raw material, the use of antiquated equipment and the deficient OHS supervision in these countries (Lu and Li, 2011) make our model uncertain in these cases. However, researchers interested in including these situations could modify the presented model to accommodate these divergent cases.

This raises the question of why knowledge and good practices in mining are not transferred between developed and developing nations. Since large multinational mining companies such as BHP Billiton (NYSE: BHP), Vale S. A. (NYSE: VALE), Rio Tinto plc (NYSE: RTP), AngloAmerican plc (OTC: AAUKY), Freeport McMoRan Copper & Gold (NYSE: FCX) or Teck Resources Ltd (NYSE: TCK) are not only active but dominant just about everywhere in the world, both in developed and developing countries, why are the differences in OHS performance so large (Disease Control Priorities Project (DCPP), 2007)?

3.5 Conclusion

To conclude, there are several studies that identify the factors favouring OHS performance and productivity as well as the causes of accidents involving equipment in the mining sector. However, there is no consensus regarding the relative importance of these elements. Moreover, literature in mining innovation used a traditional analytical thinking where analysis breaks the whole into parts and where no relation among these parts are identified. Instead of that, mining innovation management should take into account the interrelation and interdependence between the different factors and actors involved in the process. This particular point represents the biggest lack in currently available literature.

For now, the presented review provided a broad and explicit listing of factors to consider as having an impact on the leverage to be gained from technological innovation in terms of OHS performance and productivity when introducing new mining equipment. These factors should not be considered as distinct “islands”, but as parts of a whole system in which environment, actors and other identified factors are playing a crucial role.

The recommendations are not confined to a descriptive approach and explanatory, but also incorporate the use of a prescriptive approach in order to identify the real success factors, which are important and interrelated, and also how they compensate entered them in order to increase the performance of the organization. To do this, the continuation of research in the field of management of the mining equipment innovations should focus on longitudinal

studies in order to be able to identify these critical aspects, which together illustrate the systemic dynamics. Because the implementation of innovation is a process that occurs over time, longitudinal case data represents an appropriate technique to ensure that every aspect has been analysed properly.

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
Blank <i>et al.</i> (1996)	To analyse the relationship between technological development and work-related accidents in mines.	1. Sweden 2. Underground, surface and quarry, coal, metal and non-metal 3. N/A 4. 1911 to 1990	Ecological design Use of "Official Statistics of Sweden" databases and other specialized reports and publications. The relationship between technological development and workplace accidents was tested using linear regression analysis. Dependent variables: 1- annual incidence of accidents 2- annual incidents of fatal accidents. Independent variables were divided into three groups: 1- technological development 2- production intensity 3- work history and legislation.	Explanation of the annual variation in the incidence of accidents: 1. Significant variables affecting the probability of occurrence of accidents: <ul style="list-style-type: none"> • Introduction of mechanization (negative influence) • Reduction of the number of hours worked underground (negative influence) • Layoff (negative influence) 2. Significant variables influencing the propensity to declare accidents: <ul style="list-style-type: none"> • Legislative changes (positive influence) Explanation of the annual variation in the incidence of fatal accidents: <ul style="list-style-type: none"> • Introduction of mechanization (positive influence) • Introduction of automation (positive influence) Technological change alone does not explain the variations in incidence. Other key factors have an impact and should be studied: <ul style="list-style-type: none"> • Changes in the organization of work • Form of remuneration • Safety systems • Safety measures

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
Dhillon (2009)	To list the important aspects to consider for the safety of mining equipment.	1. N/A 2. N/A 3. N/A 4. N/A	Review of the literature Protocol not explicit	<p>Common factors in accidents involving mining equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operator vision hindered • Inadequate layout of control displays • Ill-conceived design • Inadequate design of vehicle entry/exit • Unguarded moving parts • Exposure to sharp edges or pinching points • Exposure to cables and hot surfaces <p>Human factors to consider in designing mining equipment for improved safety:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Design of controls: <ol style="list-style-type: none"> a. Rapid and precise identification of controls b. Resistance to inadvertent activation of controls and abuse c. Respect of worker anthropometric capacities d. Vehicle speed proportional to control adjustment speed 2. Workspace design: <ol style="list-style-type: none"> a. Respects worker body types within 5th and 95th percentiles b. Standardisation of controls with those found on other equipment c. Anticipation of hazards and actions to take d. Sharing of the workload between the hands and feet 3. Seat design: <ol style="list-style-type: none"> a. Protects against shocks from bumpy roads and minor collisions

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
				<ul style="list-style-type: none"> b. Easily repaired and replaced c. Adjusts to body dimensions, provides support and distributes weight with relief of pressure points d. Does not interfere with entry and exit from the vehicle e. Does not hinder operator control manoeuvres <p>4. Visibility:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Workstation offers an unobstructed view of surroundings and objects that must be seen by the operator b. Adequate contrast between the luminance of the object or spot of interest and the surrounding environment <p>Proper training is also necessary since the equipment is more powerful, more complex and thus requires a high level of skill.</p>
Eger <i>et al.</i> (2004)	To identify factors hindering the vision of loader-transport vehicle operators in mines.	1. Ontario (Canada) 2. Various mines in Ontario 3. 130 operators with at least one year of experience 4. N/A	Questionnaires on visibility from loader-transport vehicles in 4 parts: <ol style="list-style-type: none"> 1. Models used 2. Evaluation of the models in 7 scenarios of operation 3. Comments on modifications and recommendations to improve vision 	<p>Factors hindering operator vision:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dust (69 operators out of 130) • Fog (67/130) • Escarpments (60/130) • Low level of lighting (52/130) • Blinding lighting (47/130) • Too much brightness (28/130) • Distracting noises (9/130) • Vibrations (3/130)

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
			4. Operator experience accident history	<p>Operator recommendations:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Recommendations to improve vehicle design: <ol style="list-style-type: none"> a. Improve seat adjustment b. Install adjustable lighting supports c. Install smaller and stronger lights 2. Recommendations to improve the visibility of objects in the work zone: <ol style="list-style-type: none"> a. Increase contrast between hazards (e.g. holes) and the work zone <p>At least one third of the operators indicated that visibility problems are not discussed during training or safety meetings.</p>
Groves <i>et al.</i> (2007)	To characterize accidents associated with mining equipment and provide a descriptive analysis of these.	<ol style="list-style-type: none"> 1. USA 2. Underground and surface; coal, metal and non-metal 3. 190,940 accidents and illnesses 4. 1995–2004 	<p>Use of the MSHA (Mine Safety and Health Administration) database on workplace accidents and occupational illnesses.</p> <p>Case analysis to determine which equipment is most often involved and to characterize trends.</p> <p>With the CPS (Current population survey), analysis of the relationship accidents and age or experience.</p>	<p>Of 190,940 cases, 93,207 (49 %) involved mining equipment.</p> <p>The most often identified causes leading to non-fatal accidents or illnesses:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Handling of supplies or material (54 %) • Losing balance or falling (16 %) • Machinery (12 %) • Hand tools (11 %) • Falling rock (10 %) • Motorized transport (8 %) <p>The machines most often identified as involved in deaths:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dump truck (16 %) • Front-back loader (9 %) • Continuous miner (8 %)

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
				<p>Analysis of the relationship between accidents (fatal or not) and age (Risk index):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Risk index shows an inverse relationship with age <p>Analysis of the relationship between accidents (fatal) and age (risk index):</p> <ul style="list-style-type: none"> • The age group 55+ has the highest risk index, followed by the youngest group <p>Analysis of the relationship between accident frequency (non-fatal) and experience (inverse relationship):</p> <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 1 year (28 %) • 1–5 yrs (33 %) • 5–10 yrs (16 %) • 10–15 yrs (9 %) <p>Analysis of the relationship between accident frequency (fatal) and experience (inverse relationship):</p> <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 1 year (31 %) • 1–5 yrs (25 %) • 5–10 yrs (16 %) • 10–15 yrs (10 %)
Kecojevic <i>et al.</i> (2007)	To characterize (carry out a descriptive analysis of) deaths associated	1. USA 2. Underground and surface; coal, metal and non-metal 3. 483 cases 4. 1995–2005	Use of the MSHA (Mine Safety and Health Administration) database on fatal accidents. Analysis of the trend of the number of fatalities and descriptive statistics	<p>Types of equipment most often involved in fatal accidents:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dump truck (22.36 %) • Conveyor (9.32 %) • Front-back loader (8.49 %) • Miscellaneous (36.65 %)

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
	with mining equipment.		associated with fatal accidents. Review of the literature on the relationship between the number of accidents and mineworker experience. Identification of preventive approaches to consider.	<p>Key factors contributing to accidents:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inadequate training • Roadways of poor quality • Ill-conceived design of equipment • Seatbelt not fastened <p>Correlation with experience:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Workers with less than 5 years represented 44 % of all fatal accidents involving mining equipment. <p>Approaches to prevention to consider:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensure constant vigilance for identification and control of hazards • Proper training for operators (tutoring, simulation) • Regular evaluation of training programs <p>Put a qualified person in charge of operations involving equipment.</p>
Lynas and Horberry (2011)	To present a review of the literature on the impact of human factors on automation of mining now and in the future.	1. N/A 2. N/A 3. N/A 4. N/A	Review of literature Protocol non-explicit	<p>The requirements for introducing automation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Strong and resistant leadership on the part of managers and supervisors • Develop supervisor abilities in the management of change <p>The problems and challenges posed by human factors in association with automated equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reluctance of operators to accept the new technology • Equipment design deficient in terms of human factors • Problems with integrating multiple warning systems and alarms

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
				<ul style="list-style-type: none"> • Lack of equipment standardization • Inadequate training and support of operators • Development of operator dependence on the new technology • Organizational problems – introducing a new technology often modifies the nature of tasks • Behavioural adaptation / homeostasis – introducing a new technology can lead to higher risk operator behaviour • Being outside of the control system <p>Recommendation: Adopt a user-focused design process focused in which operators are involved at all stages of the development and implementation of the technology.</p>
Patterson and Shappell (2010)	To analyze incidents and accidents in order to identify less trends in human factors and system deficiencies in the mining sector.	1. Queensland, Australia 2. Underground, surface and quarry; coal, metal and non-metal 3. 508 accident or incident cases 4. January 2004 to June 2008	Analysis of incident and accident case reports. Expert codifying of cases, based on HFACS-MI (Human Factors Analysis and Classification System Mining Industry).	<p>Unsafe actions by the operator:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Errors of execution, skill-related (58.9 %) • Decisional errors (49.0 %) <p>Preconditions for unsafe actions:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Physical environment (39.0 %) • Technical environment (35.2 %) • Coordination, communication and teamwork (27.2 %) <p>Unsafe leadership:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inadequate leadership (28.3 %)

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
Ruff <i>et al.</i> (2011)	To improve understanding of the factors contributing to accidents involving machines and transport equipment, evaluate the safety interventions available, propose new ideas if necessary and determine if certain types of equipment or mines should receive special attention.	1. USA 2. Underground, surface and quarry; coal, metal and non-metal 3. 562 cases of accident causing death or permanent disability 4. 2000–2007	Analysis of accidents recorded in the MSHA (Mine Safety and Health Administration) database. Some information was obtained following interaction with the industry. The study was limited to accidents involving mining equipment and machinery. Number of accidents for each type of mine and machine and mine size (number of employees).	<p>Accident causal factors:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operator vision hindered • Worker desensitization to alarms • Difficulty located and prioritizing alarms • Operator fatigue • Speed • Loss of control • Seatbelt not fastened <p>Research priorities:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Improve operator vision • Improve operator training • Improve cabin design (loader/transport vehicle, CAVO and bobcat) • Proximity detection and warning <p>Recommendation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Establish close partnerships between the mining industry, equipment manufacturers, worker organizations, legislators and research organizations in order to reduce the numbers of accidents and injuries in mines. <p>In general, the more employees in a mine, the fewer the accidents:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 employees or fewer (41.3 %) • 11–49 employees (26.5 %) • 50–249 employees (32.5 %) • 250–999 employees (23.3 %) • 1000 employees or more (13.7 %)

Tableau 3.1 Scientific studies of common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the study	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
Ural and Demirkol (2008)	To compare statistical data on safety in Turkish mines to that of other countries in order to help authorities develop effective precautionary strategies and improve mining industry safety performance.	1. Turkey 2. Surface and quarry; coal and metal 3. 263 cases of accidents from 72 mines 4. Dates vary depending on country of comparison	Based on available databases, indices of safety performance for Turkey, the 15 European Union countries, the USA, Australia, New Zealand and South Africa were devised. Accident frequencies and numbers for these countries were compared. Safety statistics were evaluated for Turkey (common causes of accidents, age of injured workers and body part affected). Comparison of accident types in Turkey, the USA and New Zealand.	<p>Principal causes of fatal accidents:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blasting operations (18 %) • Motorized transport (16 %) • Falling rock (14 %) • Machinery (12 %) <p>Age distribution of injured workers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 18 years or less (8 %) • 19–24 yrs (33 %) • 25–30 yrs (22 %) • 31–37 yrs (11 %) • 38–43 yrs (17 %) • 44–50 yrs (6 %) • 51–54 yrs (3 %) <p>Recommendations:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Increased training for young workers • More experienced workers should perform more critical tasks

Tableau 3.2 Related literature examining common factors influencing OHS and productivity in the mining sector

Reference	Goal of the work	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
Beaupré (2011) Doctoral thesis	To understand how underground miners in the Abitibi-Témiscamingue region of Québec perceive the risks inherent in their trade and how they react to them.	1. Abitibi-Témiscamingue Québec (Canada) 2. Underground: N/A 3. 20 underground miners 4. 2007–2010	Semi-directed interviews and participatory observation. Use of the phenomenological situational and structural method of Paillé and Mucchielli to understand the meaning of the action undertaken by miners, as well as the structural method of Lévi-Strauss to identify recurrences and singularities in the speech of the informants.	<p>Taking charge of workplace safety:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 participants out of 20 believe that the miner alone bears the burden of responsibility for production site safety. • 9/20 indicate other persons sharing this burden, namely: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Co-workers (6/9) ◦ Miners on other the work shift at the same production site (5/9) ◦ The foreman (3/9) <p>To decrease underground risks, miners suggest, among others:</p> <ul style="list-style-type: none"> • More OHS training (9/20) • Less pressure to increase productivity (8/20) • Better communication between workers, with partners, workers on the other shift, and the foreman (5/20) <p>Other information:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 19/20 see a direct link between the productivity bonus and risks underground • (4/20) state that work experience in underground mines facilitates the perception of risks
Dupuis (2002) Monograph	To describe the strategies used by miners in Abitibi to face fear, dangers and risks inherent in their trade.	1. Abitibi-Témiscamingue Québec (Canada) 2. N/A 3. N/A 4. N/A	N/A	Good relations among the miners in a work crew are the single most important factor in decreasing the risk of accidents in underground mines.

Tableau 3.2 Related literature examining common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the work	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
Karmis (2001) Mono-graph	To present aspects of management, leadership, regulation and conformity that are relevant to health and safety in mining. Focus on establishing a culture of safety and on stimulating the will to recognize and manage OHS responsibilities. The book also describes effective OHS management systems, with focus on anticipation, identification, evaluation and monitoring of dangers to OHS.	1. N/A 2. N/A 3. N/A 4. N/A	N/A	Management of OHS in mines must take into consideration: Persons: <ul style="list-style-type: none"> ○ Age ○ Physical capacities ○ Communication ○ Experience ○ Skills ○ Leadership ○ Motivation ○ Other human traits Systems: <ul style="list-style-type: none"> ○ Design of the mine ○ Design of processes ○ Ergonomics ○ Human factors ○ Tools and equipment ○ Other factors Environment: <ul style="list-style-type: none"> ○ Culture ○ Work crews ○ Training and education ○ Management of change ○ Identification of risks ○ Leadership ○ Motivation and reward ○ OHS personnel

Tableau 3.2 Related literature examining common factors influencing OHS and productivity in the mining sector (*continued*)

Reference	Goal of the work	Research variables: 1. Location 2. Type of mine 3. Number of cases 4. Time period	Research methodology	Result: Factors influencing OHS and productivity
				<ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Risk reduction and monitoring <input type="radio"/> Supervision <input type="radio"/> Other aspects
Ouellet <i>et al.</i> (2011) Exploratory study	To define the challenges to workplace health and safety stemming from the recruitment and integration of new workers in the Quebec mining sector.	1. Quebec (Canada) 2. One underground mine and one open-pit mine 3. 2 mines 4. N/A	Case study based on semi-directed individual or group interviews with staff in charge of human resource management, representatives in charge of prevention, and trainers Open observations at workstations.	Experience is a priceless asset in the mining industry. Young workers are at increased risk.

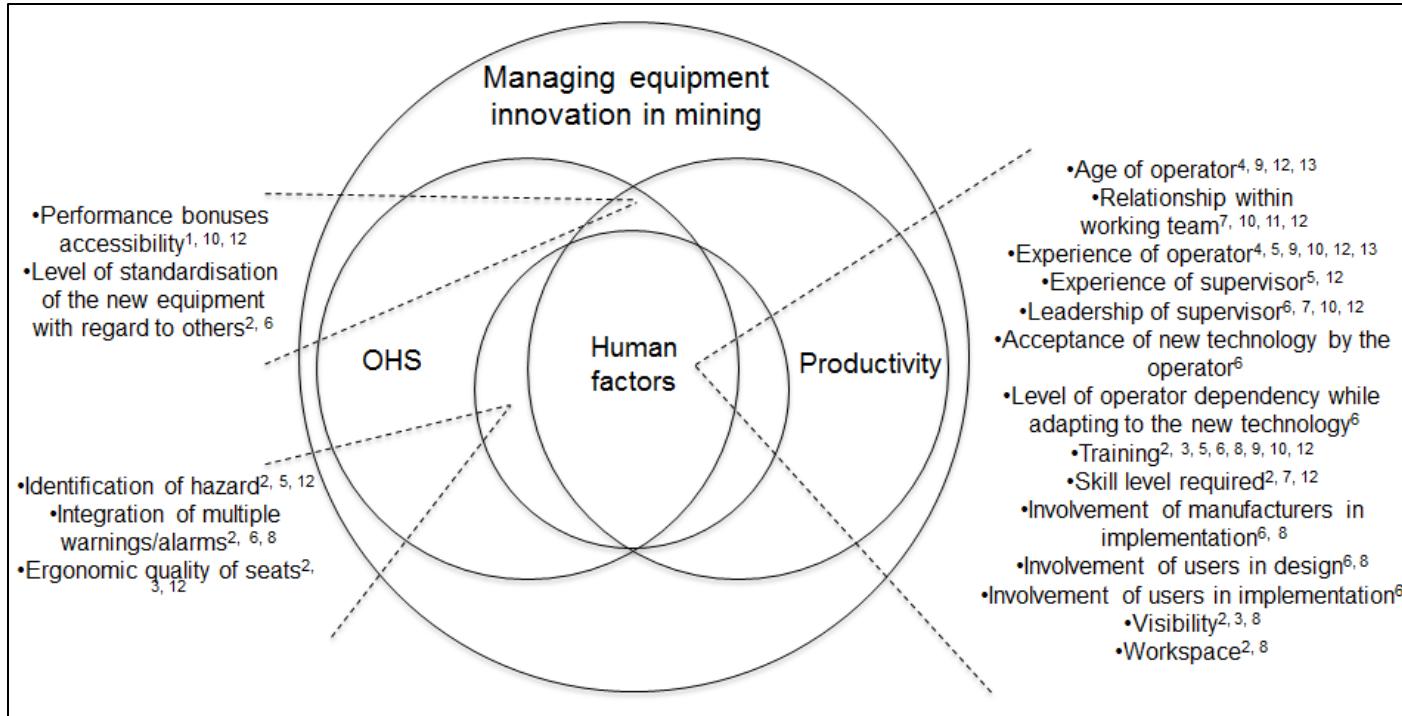


Figure 3.1 Summary of contextual factors to consider in the management of mining equipment innovations

¹ Blank *et al.* (1996)

² Dhillon (2009)

³ Eger *et al.* (2004)

⁴ Groves *et al.* (2007)

⁵ Kecojevic *et al.* (2007)

⁶ Lynas and Horberry (2011)

⁷ Patterson and Shappell (2010)

⁸ Ruff *et al.* (2011)

⁹ Ural and Demirkol (2008)

¹⁰ Beaupré (2011)

¹¹ Dupuis (2002)

¹² Karmis (2001)

¹³ Ouellet *et al.* (2011)

CHAPITRE 4

ARTICLE 2: INTRODUCTION OF INNOVATIVE EQUIPMENT IN MINING: IMPACT ON PRODUCTIVITY

Bryan Boudreau-Trudel¹, Kazimierz Zaras², Sylvie Nadeau¹, Isabelle Deschamps³

¹ Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, H3C 1K3, Canada

² Department of Management, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, J9X 5E4, Canada

³ Department of Automated Production Engineering, École de technologie supérieure, Montréal, Canada.

American Journal of Industrial and Business Management,

Volume 4, Numéro 1, Page 31-39, 2014.

<http://dx.doi.org/10.4236/ajibm.2014.41006>

Abstract

In this era of increased competition and rapid change, mining companies must remain attentive to all opportunities to gain an advantage over competitors. Acquisition of innovative equipment is often viewed as a way of decreasing operating costs, for example, by increasing machinery reliability. The objective of this paper is to examine the impact of new equipment on productivity in underground mining. Ten projects were examined using three indicators: the cost per meter drilled, the cost per hour of use and the equipment availability ratio. The results clearly show that the introduction of new equipment with technological innovations does not necessarily improve productivity. In some cases, performance indicators even dropped. We suggest that future research should focus on identifying the mechanisms and conditions that ensure the increases in productivity following the introduction of the latest innovations in mining equipment. Successful introductions of such equipment likely depend on the conditions surrounding it.

4.1 Introduction

The opening of new markets for metals and minerals represents opportunities for buyers and investors. In contrast, for existing producers and sellers, it means new competitors. These companies must learn to navigate in markets in which increasing numbers of players are trying to differentiate themselves. Compounding this challenge is rapid technological progress making communication and dissemination of strategic information easier than ever before.

Given the enormous costs associated with the development and the exploitation of a mine, mining companies must attract investors, who of course seek a competitive return on their investment. For a mine in operation, profitability depends on metal prices, ore grade, production, and operating costs. Metal prices vary with the mood of the markets, adding uncertainty and volatility. Profits could be made more secure with futures contracts, but this would repel the speculating investor. Mining companies of course have no control over ore grade, only over the decision to extract ore of a given grade. In contrast, production and operating costs are elements over which mining companies have definite control. Decisions in these areas are therefore critical for survival in a highly competitive environment in which numerous companies offer practically identical final products at the same prices.

In order to increase production and lower operating costs, one of the preferred solutions in the mining industry is to introduce innovative equipment (Bullock, 2000; Planeta and Paraszczak, 2000; Nielsen and Gether, 2004; Upstill and Hall, 2006). For reasons of time and cost of development, most mining companies prefer to buy equipment directly from the manufacturer (Bartos, 2007). However, it is not uncommon for them to modify the equipment (Horberry *et al.*, 2011), or even to custom-design it in order to meet specific needs (Boudreau-Trudel *et al.*, 2013).

4.2 Problem

The acquisition of new equipment with novel technologies such as partial automation often promises significant gains to buyers. Companies considering the purchase of new equipment seek improvements in terms of availability ratio and reduced running-in costs (Chadwick, 2008; Horberry *et al.*, 2011). However, several studies point out negative effects associated with the introduction of new technologies, among others poor operator acceptance (Lynas and Horberry, 2011), longer than expected adaptation periods due to inadequate training (Karmis, 2001; Kekojevic *et al.*, 2007; Ural and Demirkol, 2008; Dhillon, 2010; Patterson and Shappell, 2010; Lynas and Horberry, 2011; Ruff *et al.*, 2011), skill deficiencies (Karmis, 2001; Dhillon, 2010; Lynas and Horberry, 2011), over-reliance on the technology (Lynas and Horberry, 2011), and characteristics or functions differing from those of standard equipment (Dhillon, 2010; Lynas and Horberry, 2011).

The latest equipment often offers more options and features and hence more controls and commands for the operator to learn and understand. As a result, introducing new equipment is not necessarily synonymous with gain, even on the long term. There is often a trade-off between the gains provided by an innovation and the costs associated with its implementation and use. More specialized equipment with totally new functions might require a longer period of training and adaptation. The benefits generated by the new equipment must outweigh the costs of the additional training and the running-in period. The present article is focused on these particular aspects of introducing innovative equipment in the mining industries.

4.3 Methodology

In this study, we measured the impact that ten projects involving the introduction of innovative equipment had on the productivity of a North American underground goldmine, using three indicators, namely unit cost per meter drilled, unit cost per hour of use and the

equipment availability ratio. Measurements were conducted over the 12-month period following each technological introduction in order to eliminate potential biases due to variations between different periods of the year (Dessureault and Doucet, 2003). For each project, we compared the productivity measured to that achieved using the corresponding older technology over the preceding 12-month period. Since the advent of partly automated equipment has spread primarily since the beginning of the 21st century (CEMI, 2013), we limited our research to projects undertaken since this date. The ten equipment-upgrading projects examined in our study were carried out between 2005 and 2011.

4.3.1 Equipment introduction projects

Table 4.1 below summarizes the ten projects under study. Project 1 involved the introduction in 2010 of an innovative bolting machine, used to install the mesh that stabilizes the field being mined. Costing \$1 million, this machine (provided by manufacturer A) is fitted with two arms, directed from the cab by a seated operator using a joystick. Before the arrival of this equipment, the company used two different groups of bolting machines provided by manufacturer B, namely the standard groups in projects 1 and 1.5, which included respectively seven and two machines. We compared the performance of the innovative group to those of both standard groups. For the comparison of project 1.5, we should note that there is less than two years between the implementation of innovative group and the implementation of standard group.

Project 2 involved the deployment of two new-generation bolting machines obtained from manufacturer B, introduced in 2009 at a unit cost of nearly \$900,000. The basis of comparison was a group of two machines of the same model, but manufactured more than 12 years earlier. The new machines were therefore designated as innovative.

Project 3 involved the introduction in 2010 of a long-hole drill obtained from manufacturer A and costing nearly \$1.1 million. The basis of comparison was a drill obtained from

manufacturer C and dating back to early 1990; nearly twenty years and numerous features thus separated the two pieces of equipment.

Tableau 4.1 Summary of the ten equipment-upgrading projects under study

Project	Category/type of equipment	Number of units	
		Innovative ¹	Standard ²
1	Bolter/semi-automated	1	7
1.5	Bolter/semi-automated	1	2
2	Bolter/new generation	2	2
3	Long-hole drill/new generation	1	1
4	Truck/30 ton	3	10
5	Truck/50 ton	2	3
6	LHD/new generation	2	6
7	LHD/cab + air conditioning	6	4
8	Tractor/new generation	11	9
9	Tractor/different model	9	4
10	Scissor lift/new generation	2	8

¹ Introduced within 12 months of the first introduction of this type of equipment

² Included in the group used to measure productivity before the introduction of the new technology

Project 4 was the introduction in 2010 of a fleet of three 30-ton trucks obtained from manufacturer D to replace some of the ten 50-ton trucks obtained from manufacturer A. The unit cost of the new trucks was \$800,000. Dissatisfied with the performance of the 50-ton trucks because of their bulkiness, the company directors opted for new trucks with a smaller load capacity.

Project 5 was the introduction in 2005 of two 50-ton trucks purchased from manufacturer A for just over \$1 million each. The company had been using 30-ton trucks, also from manufacturer A. The company wished to reduce vehicle traffic in the galleries by increasing truck loading capacity. The basis of comparison was a group of three older trucks.

Project 6 involved regrouping two 8-yard load-haul-dump (LHD) vehicles introduced in 2009. The unit cost of these machines was just under \$1 million. Both new and old were obtained from manufacturer A, but are of different generations.

Project 7 involved introducing in 2007 six new 8-yard LHDs purchased from manufacturer A at a cost of over \$850,000 each. These came with cab and air-conditioning, both lacking in the previously used machines (also from manufacturer A). The basis of comparison was a group of four of the older 8-yard LHDs.

Project 8 involved introducing in 2010 11 new tractors purchased from manufacturer E for underground use at a unit cost of \$55,000. Used by supervisors, these tractors are designed specifically for mining. The chosen model is reputed to require less maintenance, which was the principal factor motivating the purchase. The innovative group was compared to a group of nine tractors of the same model but of a previous generation.

Project 9 involved introducing in 2008 nine tractors purchased from manufacturer E at a unit cost of \$50,000. These replaced a group of four older tractors from the same manufacturer but of a model providing a lower loading capacity (in kg and persons) and less power (HP).

Project 10 involved regrouping two new scissor-lifts purchased from manufacturer B at a unit cost of more than \$360,000 and introduced in 2010. The new platforms were chosen for their increased speed and for technical improvements such as opening on the side. The basis of comparison was a group of eight scissor lifts obtained from manufacturer F.

4.3.2 Performance indicators

Having identified the vehicles forming the innovative and standard equipment groups for each project, we searched the mining company databases for information relating to the indicators studied. In order to measure the unit cost per meter drilled, we considered the

expenditure incurred each month, in association with the use of the innovative equipment during the 12-month period following the first implementation, and with the use (and repair) of the standard equipment during the 12-month period precedent the first implementation of innovative equipment. The total cost thus calculated per group was divided by the number of meters drilled by all of the vehicles belonging to that group. These data were available for projects 1, 1.5, 2 and 3.

Total hours of use were also determined for the 12-month periods. These data, and hence the unit cost per hour of equipment use, were available for both groups for all ten projects.

In the case of equipment availability ratio, only one project could not be taken into account. Project 5 was the oldest project included in the study, and the company did not yet record availability at the time. This indicator represents equipment reliability, that is, the percentage of time that a group of vehicles was not in maintenance or repair, and hence in use or available for use. As was the case for the first two indicators, availability was calculated on the basis of 12 months.

4.4 Results

A descriptive comparison of performance based on the applicable indicator is provided below for each project. Statistical analysis (independent T-tests) was used to determine whether or not the innovative equipment provided any significant improvement over the standard (older) equipment in terms of performance as defined. The T-test results are valid if it is shown that the data are distributed normally in both of the compared groups (Lind *et al.*, 2004). The Shapiro-Wilk tests for normality of distribution are shown in Appendix C, and for 47 of the 50 data sets the normality was accepted. Based on these tests, our interpretations are reliable. Finally, the Fisher test for equality of the variances for the two groups indicated which type of T-test (i.e. for equal variances or for unequal variances) to use for each project comparison. The Fisher test results are shown in Appendix D.

4.4.1 Unit cost per meter drilled

Table 4.2 below shows the comparisons for the indicator unit cost per meter drilled, based on the aggregate costs (for all the vehicles in the group) divided by the aggregate number of meters drilled, for the same 12-month period. The results show that the innovation (new, semi-automated bolting machine) provided an improvement of less than 7 % in terms of this indicator in project 1, and increased drilling costs by more than 40 % in project 1.5. With its many new features, the new machinery presented a challenge to the operators, which required longer break-in and adaptation periods than anticipated. Overall, the new bolting machinery, at a cost of \$1 million per unit, increased drilling costs during the first year of use. However, in projects 2 and 3, the innovative groups yielded substantial reductions of the unit cost per meter drilled. In both projects, the cost per meter was reduced by at least 50 %. In the case of project 2 (52.6 %), this represented an overall annual saving of \$577,567 and an expected payback period of 3.06 years for the initial investment of \$1.8 million for the two new machines. This would be considered a relatively short period of time in business financing circles (Berk and DeMarzo, 2008). The corresponding period was 3.99 years for project 3, and nearly 71 years for project 1. Based on project 1, the investment was certainly not worth the cost if finances alone are considered.

Tableau 4.2 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of unit cost per meter drilled

Group	Project			
	1	1.5	2	3
	Bolters		Drills	
Innovative (\$/m)	4.89	4.89	3.12	4.49
Standard (\$/m)	5.23	3.46	6.58	11.23
Improvement (%)	6.5	-41.4	52.6	60.0

Table 4.3 below summarizes the results of T-tests performed in order to determine whether or not the improvements in cost per meter drilled using the innovative machinery were significant, based on the monthly measurements. The criterion for rejecting the null

hypothesis (i.e. that there is no significant difference) was a p-value of less than 0.05, meaning “the probability that the difference observed is due to chance is less than 5 %” (Lind *et al.*, 2004). The results of projects 1 and 1.5 show that the new bolters did not improve to any significant degree the cost per meter drilled. The corresponding p-values obtained for projects 2 and 3 were less than 0.05, indicating that the innovative machinery provided significant improvement in unit cost per meter drilled. These results consolidate the conclusions drawn from the payback periods.

Tableau 4.3 T-tests for the effect of innovative equipment
on the unit cost per meter drilled

Statistic	Project			
	1	1.5	2	3
	Bolters			Drills
T-value	0.2312	1.7321	-2.414	-2.704
P-value	0.5901	0.9514	0.013	0.010

4.4.2 Unit cost per hour of use

Table 4.4 shows the comparisons of innovative and standard machinery for the indicator unit cost per hour of use, aggregated over 12 months. The results show that the innovations improved performance, based on this indicator. The vehicles in the innovative groups were less likely than the others to require repair, which is not surprising, given the number of years for which the latter machines had been in service. The cost of use was reduced by more than 50 % in projects 2, 3, 4, 9 and 10. However, the improvement was relatively small (less than 20 %) in other cases, in particular projects 1.5, 5 and 6, suggesting a low return on investment. The payback period for the introduction of the two LHDs in project 6 (price tag \$1 million each) is more than 41 years. In the case of project 5, involving the introduction of two 50-ton trucks, the payback period is over 200 years!

Tableau 4.4 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of unit cost per hour of use

Group	Project										
	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Bolters			Drills	Trucks		LHDs		Tractors		Sc. lifts
Innovative (\$/h)	69.33	69.33	77.59	75.69	31.36	53.61	66.65	68.41	12.39	13.36	37.68
Standard (\$/h)	135.14	86.52	164.69	230.87	82.37	55.62	80.10	120.24	16.26	58.35	93.79
Improvement (%)	48.7	19.9	52.9	67.2	61.9	3.6	16.8	43.1	23.8	77.1	59.8

Table 4.5 below summarizes the results of T-tests performed to determine whether or not the equipment upgrade projects brought statistically significant improvements in terms of cost per hour of use, based on all monthly measurements. Except for projects 1.5, 5 and 6, the improvements were significant. However, results obtained for projects 5 and 7 must be considered with caution, since the data did not pass the test for normality of distribution (see Appendix C).

Tableau 4.5 T-tests for the effect of innovation on mining equipment unit cost per hour of use

Statistic	Project										
	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Bolters			Drills	Trucks		LHDs		Tractors		Sc. Lifts
T-value	-4.334	-0.946	-2.106	-3.401	-5.675	-1.689	-0.892	-1.823	-2.626	-3.271	-2.714
P-value	0.000	0.179	0.023	0.003	0.000	0.056	0.191	0.045	0.008	0.009	0.007

Although these results suggest that the introductions of innovative equipment are beneficial in terms of unit cost per hour, this conclusion needs to be interpreted with caution. The indicator is essentially comparing new and old machinery in terms of costs for repair and maintenance, unlike the unit cost per meter drilled, which gives information on the adaptation period, for example by comparing the number of meters drilled for a fleet of machines.

4.4.3 Availability (reliability)

Table 4.6 presents the comparison of innovative and standards groups in terms of equipment availability ratio, aggregated over the 12-month period. These results show a decline in availability for two projects (1.5 and 6) an increase exceeding 8 % for one project (2), and increases of 3–8 % for the others. These results may seem surprising since new equipment is being compared to equipment that had been in use for several years. Another interesting result was obtained for the vehicles equipped with cab and air-conditioning (project 7). There is a perception in the industry that the reliability of air-conditioned mining vehicles is lower. In the present study, this type of vehicle provided the second best improvement in terms of availability.

Tableau 4.6 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of availability ratio

Group	Project										
	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Bolters		Drills	Trucks		LHDs		Tractors		Sc. lifts	
	Availability (%)										
Innovative	78.5	78.5	85.3	78.5	87.3	N/A	82.1	84.7	97.9	93.0	96.2
Standard	77.0	85.8	71.0	71.3	80.8	N/A	83.2	77.0	92.7	89.9	90.5
Improvement	1.6	-7.3	14.4	7.2	6.4	N/A	-1.1	7.7	5.2	3.1	5.7

N/A: not applicable

Table 4.7 below summarizes the results of T-tests performed on the basis of the monthly measurements in order to determine if the equipment-upgrading projects provided statistically significant improvement in availability. Improvement was significant for projects 2, 4, 7, 8 and 10. This is to say that half of the projects (1, 1.5, 3, 6 and 9) did not lead to improved equipment availability. This result is interesting because it included the three equipment categories for which more than one upgrading project was undertaken. Only one new group of bolters provided significant improvement (project 2) and the same was observed for LHDs (project 7) and tractors (project 8). For these types of equipment at least,

upgrading may or may not lead to improved availability. We note here that based on the T-test, the improvement in the reliability of vehicles equipped with cab and air-conditioning was unequivocal (Table 4.7).

Tableau 4.7 T-tests for the effect of innovation on equipment availability in mining

Statistic	Project										
	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Bolters		Drills	Trucks		LHDs		Tractors		Sc. Lifts	
T-value	0.462	-1.943	4.999	1.386	3.782	N/A	-0.520	3.467	6.328	1.652	2.829
P-value	0.326	0.963	0.000	0.093	0.001	N/A	0.695	0.001	0.000	0.058	0.005

The T-test result for project 10 must be interpreted with caution since the data did not pass the test for normality of distribution (see Appendix C).

4.5 Discussion

Measuring the performance indicators over a 12-month period gives our results a certain internal validity. Other indicators could be used, such as tonnage/miner/year (Bartos, 2007; Sari *et al.*, 2009). However, we chose three simple indicators recognized in the field (Chadwick, 2008; Horberry *et al.*, 2011) in order to facilitate duplication of our method for future researches. Other companies can easily use these indicators to measure the performance of their equipment introduction projects, although comparison of their results with ours would be of limited value, given the particularities of each environment.

Although our focus was productivity, the motivation for introducing technological innovations may be broader. Improvements in working conditions may be sought. This appears to have been the particular aim of projects 1.5 and 7. The semi-automated bolting machine in project 1.5 eliminates certain operations that were once manual, such as raising and moving mesh. The LHD with cab and air conditioning in project 7 offers operators a safer and more comfortable working environment. As our results show, these projects arrived

at quite different results, namely decreased productivity in terms of \$/meter and availability ratio in the case of the bolting machine, versus benefits in terms of cost per hour of use and availability ratio in the case of the LHD. This comparison highlights the dilemma of decision makers, since the impact of innovation on productivity and on OHS is inconsistent. Complicating the decision is the current shortage of skilled manpower in the mining sector. Working conditions may attract some workers, while performance bonuses may be more interesting to others (Dupuis, 2002; Beaupré, 2011; Lynas and Horberry, 2011; Ruff *et al.*, 2011). The choice often involves a trade-off, for example between a level of risk and the speed of a LHD.

Our results challenge widespread belief that bigger is better, as claimed by various authors (Doggett, 2006; Bartos, 2007). As reported by Chadwick (2008), smaller equipment may match or even exceed the performance of larger equipment. We noted such a result in the case of project 4, which compared the introduction of 30-ton trucks to the existing 50-ton truck fleet. In terms of both cost per hour of use and availability ratio, the smaller equipment was shown to bring a significant increase in performance. Smaller may be better.

Although brand-new machines were compared to those that had been in use for several years, only half of the equipment introduction projects led to improved availability ratio. Based on the T-tests, fewer than half of the projects led to significant improvement of the performance indicators studied: only one of the three bolter projects, one of the two trucks projects, one of the two LHD projects and one of the two tractor projects. Our study provides no basis for generalizing about any machine type.

Since our results show that the acquisition of innovative mining equipment does not automatically bring gains in productivity, we suggest that future research focus on identifying the mechanisms and conditions that are involved when the introduction of innovation does generate an increase of the productivity. What are the conditions in common among the projects that lead to an increase in productivity? Based on our interviews and

observations in the field, it appears that ergonomics are sometimes neglected when designing new machinery. Other researchers have raised this concern (Dhillon, 2010; Ruff *et al.*, 2011). Furthermore, a variety of human factors may also have an influence on the success of implementation of novel machinery technology (Karmis, 2001; Lynas and Horberry, 2011; Boudreau-Trudel *et al.*, 2012), but these remain to be measured.

Equipment automation warrants special consideration. As Bill Gates stated, "The first rule of any technology used in a business is that automation applied to an efficient operation will magnify the efficiency. The second is that automation applied to an inefficient operation will magnify the inefficiency". The second rule appears to apply to the semi-automated bolter. Fully automated machinery has yet to prove its worth, although some researchers are working on it (Lynas and Horberry, 2011), and North American mining companies continue to prefer semi-automated machinery. Several issues, including maintenance, need to be resolved in order to maximize the benefits of automation (Gustafson, 2011). The availability ratio of the bolter in project 1 reflects this challenge, and with results like these, the rarity of automated underground mining equipment is not surprising. Automation has been spreading in North American mining since 2010, but less than on other continents. Only three sites use automated vehicles: Elko (Nevada), Helmo Camp and Kidd Creek (Ontario). In Canada, human intervention will remain indispensable, according to several mining companies. We do not expect to see a fully automated mine working efficiently any time soon. The LHD is the vehicle closest to being operated from the surface, but this practice has yet to prove its worth (Gustafson, 2011). Other types of equipment such as bolters and jumbos are not even close to becoming fully automated. Human workers will continue to activate and drive bolters and drills for the foreseeable future, primarily because bolting is so crucial to the structural stability of galleries and hence the safety of miners, and because drilling is the most specialized task underground, as well as the most prestigious from a professional perspective, and human input adds value to the drilling process.

4.6 Conclusion

The main contribution of our study is a demonstration based on objective data that the acquisition of innovative equipment in underground mining does not automatically bring gains in productivity. Our results show that the new equipment may perform less efficiently than the old equipment, and this in spite of the very high cost of its purchase. Finally, our findings suggest the importance of identifying the mechanisms and conditions that allow an increase in productivity following the introduction of innovative mining equipment.

CHAPITRE 5

ARTICLE 3: INTRODUCTION OF INNOVATIVE EQUIPMENT IN MINING: IMPACT ON OHS

Bryan Boudreau-Trudel¹, Sylvie Nadeau¹, Kazimierz Zaras², Isabelle Deschamps³

¹ Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, H3C 1K3, Canada

² Department of Management, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, J9X 5E4, Canada

³ Department of Mathematics and Industrial Engineering, École Polytechnique de Montréal, 2900 Boulevard Edouard-Montpetit, Montréal, H3T 1J4, Canada.

Open Journal of Safety Science and Technology

Volume 4, Page 49-58, 2014

<http://dx.doi.org/10.4236/ojsst.2014.41007>

Abstract

Occupational health and safety in mining has clearly improved in developed countries over the past twenty years, but accidents and illness still occur with unacceptable frequency. The arrival of new mining equipment, bigger, more powerful and complex and requiring a higher skill level appears also to increase certain specific risks of accident and work-related illness. The objective of this paper is to examine the impact of new equipment on occupational health and safety in underground mining. The injury rate associated with eight equipment introduction projects was examined. The results show clearly that the introduction of new equipment with technological innovations does not automatically reduce the injury rate. The new equipment may even generate a higher injury rate than the equipment it replaced. Ergonomic deficiencies were noted in some of the new equipment. We suggest that future research focus on identifying the mechanisms and conditions that determine injury rate

following the acquisition of innovative as means of improving occupational health and safety in mining. Successful implementation of new mining equipment appears to depend on the specific conditions of use.

5.1 Introduction

Over the past decade, we have witnessed a mining boom that has led businesses to venture into markets in which an increasing number of players are trying to differentiate themselves. As a result of this expansion, the mining industry now faces a serious shortage of qualified workers. Concurrent with this challenge are rising expectations of workers and society as a whole with regard to occupational and health safety (OHS).

Even though accidents and occupational illnesses continue to occur with unacceptable frequency (Kecojevic *et al.*, 2007), OHS in mining has clearly improved in developed countries over the past twenty years. For example, in the province of Québec (Canada) the injury rate was 15.0 per 100 workers per year in 1993 and has since dropped to 3.5 in 2013 (APSM, 2013).

The improvement of safety in mining is due to a host of factors, including modular training programs, better systems design, and technical advances in mining methods and equipment (MMSD, 2002). Many physically demanding manual tasks are now being carried out with mechanical devices, the operation of which is increasingly becoming semi-automated (Horberry *et al.*, 2011; CEMI, 2013).

5.2 Problem

The arrival of new bigger, more powerful and more complex mining equipment requiring a higher skill level appears also to introduce certain specific risks of accidents and work-related injury or illness. These are due to multiple factors such as reduced visibility and

increased noise and vibration (Kumar, 2004; Eger *et al.*, 2004; Eger *et al.*, 2006; Coleman and Kerkering, 2007; Ouellet *et al.*, 2011).

This has been demonstrated in a study by Ural and Demirkol (2008) showing that mining accidents and incidents in the United States and New Zealand are now associated primarily with machinery (respectively 34 % and 18 %) and powered haulage (respectively 29 % and 36 %). The study by Kecojevic *et al.* (2007) shows that over 30 % of all equipment-related fatalities in mining in the USA during the period 1995-2005 involved haul trucks (22.3 %) and front-end-loaders (8.5 %). Among the 562 serious accidents (fatal or causing permanent disability) occurring over the period 2000-2007 in the US mining industry, bolting machines, haul trucks and front-end loaders are the most frequently involved mobile machines Ruff *et al.* (2011).

These statistics lead some researchers to conclude that new mining equipment technology changes the nature of mining tasks, which may lead to new hazardous situations if the new activity is not carefully analysed, properly understood and taken into due consideration (Dhillon, 2010). Even though the high proportion of accidents involving equipment does not lead directly to the conclusion that the changes in the nature of the tasks are the cause, this is an hypothesis that can't be rejected and should be examined, since it is consistent with current knowledge in human factors engineering.

The present article is focused on characterizing the impact that introducing innovative equipment may have on OHS in the mining industry.

5.3 Methodology

For the purposes of the present study, we measured the impact of eight equipment introduction projects on OHS in a North-American underground goldmine, using frequency of injury as the performance indicator. We choose this indicator because it allows

comparison of current and past performance with a certain degree of confidence (Karmis, 2001). Our oldest equipment introduction project took place in 2005 and our most recent in 2011. We limited our research to permanent employees of the selected mine. Mechanics, supervisors and contractors were not included in our analysis. Measurements were performed over the 12-month period following each technological introduction in order to eliminate potential biases due to variations between different periods of the year (Dessureault and Doucet, 2003). We compared the OHS performance associated with each project to the corresponding performance recorded for the preceding 12-month period with the supplanted technology.

5.3.1 Equipment introduction projects

Table 5.1 below summarizes the eight projects under study. Each of these vehicles cost nearly \$1 million, except for the new scissor-lifts in project 8, which cost about \$350,000 per unit. Project 1 involved the deployment in 2010 of a semi-automated bolter from manufacturer A. This machine installs the screen that stabilizes the field being mined. The operator (seated) uses a joystick to direct the two booms. Before its introduction, the company used two different groups of bolters (both provided by manufacturer B) with platform lifts, namely the standard groups in projects 1 and 1.5, which included respectively seven and two machines. The performance of the innovative group was compared to those of both standard groups. In the case of project 1.5, it should be noted that the innovative and standard groups were introduced less than two years apart.

Project 2 involved the deployment of two new-generation bolters acquired in 2009 from manufacturer B. The intention of their novel design was to minimize physical effort and fatigue. The OHS record associated with their use was compared with that of two units of the equivalent model obtained from this manufacturer more than 12 years earlier. The bolters in both groups are equipped with platform lifts.

Project 3 involved the acquisition in 2010 of a flexible electro-hydraulic long-hole drilling rig. Purchased from manufacturer A, this remote-controlled drill is used for large-scale production drilling. It was compared to a drill obtained from manufacturer C and dating back to early 1990, twenty years of technological improvement and new features thus separating the two drills.

Tableau 5.1 Summary of the ten equipment-upgrading projects under study

Project	Category/type of equipment	Number of units	
		Innovative ¹	Standard ²
1	Bolter/semi-automated	1	7
1.5	Bolter/semi-automated	1	2
2	Bolter/new generation	2	2
3	Long-hole drill/new generation	1	1
4	Truck/30 ton	3	10
5	Truck/50 ton	2	3
6	LHD/new generation	2	6
7	LHD/cab + air conditioning	6	4
8	Scissor lift/new generation	2	8

¹ Introduced within 12 months of the first introduction of this type of equipment

² Included in the group used to measure productivity before the introduction of the new technology

Project 4 involved the arrival of a fleet of three 30-ton trucks in 2010 to replace some of the ten 50-ton trucks obtained from manufacturer A. The new trucks were purchased from manufacturer D. The company directors were disappointed with the productivity performance of the 50-ton trucks and therefore decided to replace them with new trucks with a smaller load capacity.

Project 5 involved the arrival in 2005 of two 50-ton trucks to replace their three 30-ton trucks. Both trucks were obtained from manufacturer A. By using trucks with a bigger loading capacity, the company hoped to reduce vehicle traffic in the galleries.

Project 6 involved the introduction of two 8-yard load-haul-dump (LHD) vehicles in 2009. The basis of comparison was a fleet of six old LHDs. Both new and old were acquired from manufacturer A, but are of different generations. The new vehicle has a newly redesigned operator cabin that is supposed to provide easier access, improved visibility, efficient air conditioning, and lower noise level.

Project 7 involved the introduction in 2007 of six new 8-yard LHDs obtained from manufacturer A. These were the first LHDs with cabin and air-conditioning to be used in this mine. The basis of comparison was a group of four of the older 8-yard LHDs from manufacturer A.

Project 8 involved the deployment in 2010 of two new scissor-lifts introduced that year by manufacturer B. These new platforms were selected for their increased speed and for technical improvements such as opening on the side. They were compared with a group of eight scissor-lifts obtained from manufacturer F.

5.3.2 Performance indicator

We searched the mining company databases for OHS events involving the vehicles in the different groups being compared. Injury rate (IR) was used as the indicator of OHS performance. Incidence was calculated for the innovative equipment during the 12-month period following the first implementation, and for the standard equipment during the 12-month period preceding the first implementation of the innovative equipment.

The IR is preferable to the real number of accidents because it indicates the number of accidents occurring for a fixed number of employees or employee-hours. This allows comparison to past performance with a certain degree of confidence (Karmis, 2001). The literature is replete with justification for its universal and standardized use (Coleman and

Kerkering, 2007; Ural and Demirkol, 2008; MSHA, 2013). The IR represents the number of injuries that occurred per 200,000 employee-hours worked, calculated as follows:

$$\text{IR} = \frac{\text{Number of injury occurrences}}{\text{Total hours worked by employees}} \times 200,000 \quad (5.1)$$

The calculation is based on 200,000 hours in North America and on 100,000 hours in Europe. The average number of hours worked by 100 workers in North America is about 200,000 (100 X 40 hours X 50). Because our study focuses on the impact of new equipment, we replaced the "total hours worked by employees" by the "total hours of equipment use" for each project.

5.4 Results

Table 5.2 below summarizes the results of our study. Only half of the projects provided any improvement of the IR indicator. Improvement was noted in the case of the semi-automated bolters (projects 1 and 1.5), the new drills (project 3), and the replacement of the 50-ton trucks by the new 30-ton trucks (project 4). Among the remaining projects, the arrival of new equipment actually increased the IR, with the exception of project 5 (no effect of truck loading capacity on IR).

Tableau 5.2 Comparison of innovative and standard mining equipment in terms of IR

		Innovative			Standard		
	Project	Hours Worked	Number of injuries	IR	Hours Worked	Number of injuries	IR
Bolters	1	2,900	1	68.97	19,880	14	140.85
	1.5	2,900	1	68.97	7,047	6	170.29
	2	6,715	7	208.49	4,664	4	171.53
Drills	3	2,406	1	83.13	1,662	1	120.34
Trucks	4	4,486	0	0.00	33,389	12	71.88
	5	5,020	0	0.00	9,555	0	0.00
LHDs	6	3,573	3	167.93	22,862	6	52.49
	7	19,215	7	72.86	12,657	3	47.40
Sc. Lifts	8	1,454	2	275.10	4,130	2	96.85

In order to provide more information on the impact of the innovative equipment, several excerpts from injury reports associated with some of the projects (bolters, trucks and LHDs) are listed in the following section. We selected these projects because the reports provided valuable insight into specific aspects of OHS risks in mining.

5.4.1 Bolters (projects 1 and 1.5)

The innovation in projects 1 and 1.5 is a semi-automated bolter with two booms (Figure 5-1, left side), one for lifting and holding the screen and the other for drilling and inserting bolts, allowing operators to stay in the cabin and control both booms with a joystick. To compare, we are examining the IR associated with a machine which requires stepping up and down a flight of steps to the platform, the manual handling and holding of screens, and exposes workers from rocks falling from the gallery roof (Figure 5.1, right side).

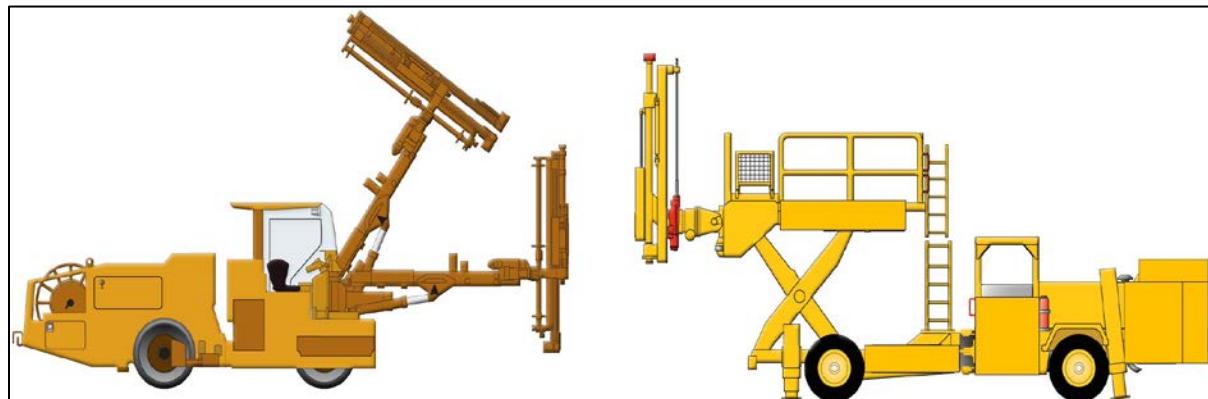


Figure 5.1 Semi-automated bolter VS standard bolter

As shown in Table 5.3 below, many of the injuries occurred while handling screens or stepping down from the platform. Both activities have been almost eliminated with the arrival of new bolter. There is no longer a flight of steps, and the handling of screens is now very limited (see Figure 5-1). The elimination of these actions explains why the IR went from 140.85 (project 1) and 170.29 (project 1.5) to 68.97 with the introduction of the new bolter.

Tableau 5.3 Excerpts from reports of injuries involving bolters

Bolters			
Event #	Project 1 - Standard	Event #	Project 1.5 - Standard
1	While installing a screen on the gallery roof, a small rock slipped onto the screen and struck my finger.	1	While stepping down from the BO to the floor, my foot slipped near the joint (center) and I fell on my ribs on my right side.
2	I was handling a screen to install it on the boom when I felt lower back pain on the right side.	2	While grabbing a screen on the side of the bolter, I felt a pain in my back.
3	On the BOXXX, I stumbled on a 5-gallon oil container and jammed my left thumb.	3	While handling a screen, I felt a pain at the base of the neck on the left side.
4	While attaching a sheet of screen to the ceiling, a rock fell on my forearm (size of rock: 4" X 4").		
5	While bolting my ceiling with the BOXXX, I raised my platform and was in the bawl at a height of 6.5 m. I banged my head on a rebar on the roof, hurting my neck badly.		
6	While stepping down from the bolter, my right foot slipped and my entire weight came down on my left ankle.		

5.4.2 Trucks (project 4)

Table 5.4 shows excerpts from injury reports associated with the standard truck group in project 4. Analysis of these reports reveals that the big 50-ton trucks caused visibility problems for the operators. Operators were unable to see big rocks or holes on road and drove over them, often sustaining injury to the back or head as a result (events 2, 3, 6, 8). These injuries appear to have been exacerbated by the additional problem of the level of the suspension of seats, as well as insufficient headroom inside the cabin. These were not the only injuries associated with the ergonomics of the 50-ton trucks. Events 1, 4, 5, 7 and 9 appear to have similar causes. All of these concerns appeared to be resolved completely

following the introduction of the new 30-ton trucks, since *no* injuries occurred over the subsequent 12-month period (Table 5.2).

Tableau 5.4 Excerpts from reports of injury involving trucks

Trucks	
Event #	Project 4 - Standard
1	While climbing onto the side of the 50-ton truck to fuel up, I felt a deep pain on the side of my right knee.
2	I drove the truck over a rock (not seen because it was in a blind spot) in a curve and my body hit the inside of the CAXXX. Pain in the back, neck and right knee.
3	I drove over a rock and my head hit the cabin ceiling violently. Bad neck pain.
4	While stepping down from the truck, I stepped on a rock with my left foot and twisted my ankle and felt an intense strain in the calf muscle.
5	While stepping down from the truck, the door closed on my thumb. Crushed right thumb, nail turned black.
6	While negotiating a turn, employee X drove the 50-ton truck over a 2' X 2' rock, banged his head against the cabin ceiling and went into the front wall near the electric bay. Pain in the neck and shoulders.
7	While getting into the truck, I grabbed the handle and felt a burning pain in my right shoulder.
8	Driving the CAXXX with the seatbelt attached, I entered level X and drove over a hole, giving me a jolt in the lower back and top of the neck because of the belt.
9	While trying to hang up the microphone of the radio in the CAXXX, I cut my right index finger on the rack that holds the microphone.

5.4.3 LHDs (project 7)

The purpose of project 7 was to introduce the first LHDs with cabin and air conditioning, primarily to provide safer and better working conditions to operators. The cabin provides protection against dust and falling rocks, while the air conditioning provides a cooler and more comfortable working environment. However, analysis of the reports reveals that the introduction of these new LHDs also brought new risks for the operators (Table 5.5). The cabin seems to have some design problems, since operators banged their heads on the ceiling (events 1 and 2) and their bodies collided with different parts of the inside of the cabin

(events 3, 5 and 6). As a result of these ergonomic deficiencies, the IR went from 47.40 to 72.86 following the arrival of the LHDs equipped with cabin and air conditioning.

Tableau 5.5 Excerpts from the reports of injuries involving LHDs

LHDs	
Event #	Project 7 - Innovative
1	I drove the scoop over a rock and banged my head against the cabin ceiling. I felt a crackle in my neck.
2	The road to my drift was in very poor condition and I drove over a hole and banged my head against the ceiling of the cabin. I lost my helmet and I since have neck pain and headaches.
3	While picking up a big rock, it fell from the bucket [shaking the cabin] and I struck my right elbow against the hinge of the dash of the LHDXXX.
4	While getting out of the LHD I stepped on a loose rock and twisted my left ankle.
5	My knee struck the cabin fire extinguisher support while I was coming down from the scoop.
6	While coming down from the scoop, I banged my left elbow on the wing of the scoop.

5.5 Discussion

Since our OHS performance indicator is the injury rate, reliance on equipment operators to report their injuries represents the principal limitation of our research. Minor injuries might have been underreported. In order to analyse our results within a reasonable time, we focused on a 12-month period. This is sufficient to allow confirmation of internal validity of the results. Other indicators could be used, such as severity of injuries based on workdays lost, as used by Coleman and Kerkering (2007) and by Groves *et al.* (2007). However, the mine in which we performed our study does not keep such records. Injury rate is a well-recognized indicator in the field (Coleman and Kerkering, 2007; Ural and Demirkol, 2008; MSHA, 2013), and will facilitate the reproduction of our method in future research.

The focus of our study was the impact of new and innovative production equipment on OHS, but in the mining industry as in other businesses, the motivation for investing in such

equipment may be based on a broader range of considerations. One of these is of course improvement of productivity. In the current context (a mining boom since the beginning of this century), mining companies are trying to attract investors by maintaining a cost structure with operating costs as low as possible. A favoured approach has been to purchase new equipment with bigger capacity in order to reduce the number of vehicles and hence of operators. This was the aim of project 5 in particular with the introduction of 50-ton trucks to replace the existing 30-ton truck fleet. However, the 50-ton trucks did not bring the expected gain in productivity, and the company decided to go back to 30-ton trucks. Although motivated primarily by productivity, this decision led to a lower IR and hence an improved OHS performance.

On the other hand, some projects (e.g. project 7) that were intended to upgrade working conditions, ended up causing an increase in IR. The new fleet of LHDs with cabin and air conditioning was supposed to provide a better and safer working environment, but also brought new risks to operators because of deficient cabin design. This observation corroborates much previous research on load-haul-dump vehicles showing that the cabins of such vehicles suffer from poor ergonomic design (Eger *et al.*, 2004; Eger *et al.*, 2006; Eger *et al.*, 2008a; Eger *et al.*, 2008b; Dhillon, 2010; Ruff *et al.*, 2011). Operators' visibility and posture are often cited as major concerns in these studies. Many injuries related in our study confirm the visibility concern (in addition to cabin headroom), these resulting from operators driving over rocks or holes and banging their heads against the cabin ceiling.

The purchase of semi-automated bolters (projects 1 and 1.5) was intended essentially to reduce or eliminate specific risks for the operators (the steps up to the platform, handling of mesh, exposure to rock fall). The goal was achieved in this case, as proven by the decrease in the IR. In the mining industry, some actors assume that automated technologies are unreliable (Gustafson, 2011; Lynas and Horberry, 2011). This perception appears to be a major barrier to the spread of automated equipment in underground mining. Automation usually brings many benefits. It offers a safer working environment by removing the

operators from hazardous situations (as our results show), enhances precision (e.g. in drilling), allows mining in spaces not previously accessible to humans, and reduces the manning of equipment.

The results of the introduction of a new non-automated bolter (project 2) show that bolters still have a high IR. An explanation for these results is suggested in a preliminary ergonomic study of a bolting machine and a drill (Roque *et al.*, 2014), in which many ergonomic problems were noted in association with operator discomfort, affecting in particular the torso, the head and the feet. Limited cabin space, especially headroom, was another concern raised in that study.

The new and bigger equipment also led to collateral accidents. We did not measure their frequency in our study, but they should be taken into consideration. Because of their size, particularly of the 30-ton and 50-ton trucks and the LHD, the tires of these mining vehicles are huge. These tires leave deep tracks in the paths, which sometimes become problematic for small vehicles such as tractors and pick-up trucks, to name just two. These smaller vehicles can even overturn when they pass over tracks left by the big vehicles, which is obviously a very dangerous occurrence for workers seated inside them. In the case of this type of accident it is difficult to identify the culprit since several vehicle types use the same tires. But there is no doubt that these big vehicles create risks for workers using smaller vehicles.

Several studies show that mining companies around the world prefer to purchase equipment from manufacturers instead of developing it themselves (Statistics Canada, 2002; Hood, 2004; Upstill and Hall, 2006; Yudelman, 2006; Bartos, 2007). In fact, investment in technological development in the mining sector is in decline (Bartos, 2007). Most mining companies now appear to rely on keeping abreast of technologies being developed by third parties, in particular equipment manufacturers, and acquiring these technologies as the need arises (Hood, 2004; Yudelman, 2006). In-house R&D expenditure in the mining sector as a

whole is small in comparison with other sectors (Bartos, 2007). R&D budgets reflect the widespread consolidation of mining companies over the past decade as a result of globalization. No more than 10 % of the annual cash flow is spent on R&D in the mining industry, compared with 51 % at the pharmaceutical company Pfizer Inc. and 37 % at Microsoft (Lasonde, 2006). Among Canadian mining companies, expenditure on R&D in 2011 was less than 1 % of gross income (Statistics Canada, 2013). The Canadian mining company Osisko stated in a published document (Osisko, 2011) that from 2001 to 2010 the Canadian mining industry as a whole spent more on R&D (\$16.8 billion) than did the pharmaceutical industry (\$12.2 billion). However, this expenditure was primarily for exploration and not for the development of new machinery or processes needed in extraction. Nonetheless, we cannot leave untold an important research network, which was born in Canada in January 2014, the Ultra-Deep Mining Network (UDMN). One of the purposes of the UDMN, a \$46 million business-driven network, is to generate fruitful collaborations between mining industry and research entity in order to answer critical challenges relate to resource extraction in ultra-deep mining environments (CEMI, 2014).

Globalization has also had an impact on mining equipment manufacturers, which are now multinational corporations. Their product lines are designed to satisfy as many potential clients as possible around the world. This generalist approach makes it more difficult to adapt equipment to the particular needs of specific users. Rather than working with manufacturers to design equipment meeting these needs, mining companies prefer to purchase “from the warehouse”. For vehicles that retail at a million dollars per unit, this practice is perplexing, especially in view of results such as we observed. A reasonable compromise between costly, time-consuming in-house R&D and purchasing directly from the manufacturer’s catalogue could be calling for tenders to meet technical specifications. Considering that multi-million-dollar orders for fleets of equipment are at stake, it is difficult to imagine such calls for tenders not motivating mining equipment manufacturers to share the cost of the required adaptations.

Our results show that new equipment sometimes brings improved IR and sometimes does not, even when improving IR was the principal motivation for the purchase. This irregularity demonstrates clearly that the acquisition of innovative mining equipment does not automatically improve operational safety. In view of this, we suggest that future research focus on identifying the mechanisms and conditions that are involved when the introduction of innovation does help to reduce the IR. Furthermore, the success of implementation of machinery with novel technology may also be influenced by numerous human factors (Karmis, 2001; Lynas and Horberry, 2011; Boudreau-Trudel *et al.*, 2012; Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a), of which the key ones remain to be identified and measured.

5.6 Conclusion

The main finding of our study is a clear demonstration based on an objective indicator that the acquisition of innovative equipment by the participating underground mining company did not automatically reduce the incidence of workplace injury. The example of the LHD purchase, expected to improve working conditions (with an air-conditioned protective cabin) but in reality having the opposite effect, shows that new equipment does not always meet expectations.

In summary, our results show that new equipment purchased directly from manufacturers may generate a higher IR than the old equipment and that new equipment still suffers from poor ergonomic design, and all this in spite of the very high cost of its acquisition.

Successful implementation of technological innovation requires more than just buying new equipment. It requires taking into account the environment in which the equipment will operate, the needs and characteristics of the operators involved, and also the expectations of the decision makers.

Our findings show the importance of identifying the mechanisms and conditions that determine the frequency of injuries following the acquisition of innovative equipment as means of improving OHS in the mining sector.

CHAPITRE 6

ARTICLE 4: INTRODUCTION D'ÉQUIPEMENTS MINIERS INNOVANTS: LES FACTEURS CLÉS POUR UNE IMPLANTATION RÉUSSIE

Bryan Boudreau-Trudel¹, Sylvie Nadeau¹, Kazimierz Zaras², Isabelle Deschamps³

¹ Département de génie mécanique, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, H3C 1K3, Canada

² Département des sciences de la gestion, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, J9X 5E4, Canada

³ Département de mathématiques et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, 2900 Boulevard Edouard-Montpetit, Montréal, H3T 1J4, Canada

Travail et santé (volet article scientifique)

Soumis (avril 2014)

Résumé

Avec l'augmentation de la pression sociale depuis les deux dernières décennies, les entreprises minières ont dû accorder davantage d'importance à la santé et la sécurité de leurs travailleurs. Cette évolution des mentalités a eu des répercussions sur le choix des nouveaux équipements introduits sous terre. Ceux-ci ont dorénavant le double défi d'améliorer la productivité ainsi que la santé et sécurité des travailleurs. Toutefois, l'introduction d'équipements innovants ne garantit pas un succès, tant en productivité qu'en santé et sécurité. L'objectif de cette étude est d'identifier les facteurs clés pour une implantation d'équipements innovants réussie.

Pour répondre à cet objectif, nous avons utilisé un outil d'aide à la décision multiattribut, l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance. Dix projets d'équipements innovants ayant été implantés dans une mine souterraine québécoise ont été analysés. À

partir de ces projets, l'outil a permis l'identification simultanée des facteurs les plus pertinents et des seuils critiques de ces facteurs pertinents afin d'obtenir différentes catégories de performance. Ces catégories ont été établies pour quatre indicateurs de performance: le coût par mètre foré, le coût par heure d'utilisation, le ratio de disponibilité et le taux de fréquence des accidents.

Parmi les résultats obtenus, deux facteurs ont été identifiés comme les plus pertinents sur l'ensemble des quatre indicateurs de performance: le niveau d'habileté requis et le niveau d'acceptation des opérateurs. Également, la qualité du siège et l'expérience des opérateurs se sont montrées pertinentes pour expliquer les résultats en santé et en sécurité du travail, alors que le niveau de standardisation du nouvel équipement s'est avéré pertinent pour expliquer les résultats du côté de la productivité.

Ces résultats aideront les dirigeants de la mine participante dans leur gestion de l'innovation en équipements miniers en portant une attention particulière à ces facteurs clés et à leurs seuils critiques afin d'obtenir une implantation réussie.

6.1 Introduction

L'industrie minière évolue dans un environnement économique changeant, provoqué par des cycles économiques où le prix des métaux est vulnérable à l'humeur des marchés boursiers mondiaux. À cela s'ajoute la concurrence des pays émergents. Ces facteurs exogènes stimulent le besoin de technologies pour hausser la productivité pour les entreprises de ce domaine (Bartos, 2007). Mais encore, la productivité ne constitue plus le seul élément dictant le choix d'équipements comme ce fut le cas à la genèse de cette industrie (Vallières, 1989). En effet, l'importance de la santé et de la sécurité au travail (SST) s'accentue pour plusieurs entreprises minières compte tenu de l'augmentation de la pression sociale (Groupe de travail sur le permis social, 2010). Le choix de l'équipement doit donc répondre à ce double défi

qu'est l'augmentation de la productivité de même que l'amélioration de la SST (Upstill et Hall, 2006; Dhillon, 2010).

Toutefois, l'introduction d'une innovation ne garantit pas un succès face à ce double défi. Bon nombre d'études soulignent les contrecoups suivant l'introduction d'une nouvelle technologie. Du côté de la productivité, le Centre for Excellence in Mining Innovation (CEMI) affirme que le nombre de mètres d'avancement par jour en Ontario a connu un déclin avec l'arrivée de nouvelles technologies associées à l'équipement électro-hydraulique, de même qu'avec l'automatisation, passant de 15m/jour en 1980 à seulement 3,8 m/jour en 2011 (CEMI, 2013). Alors que du côté de la SST, plusieurs chercheurs démontrent la forte proportion d'équipements miniers en cause dans les accidents et décès survenus depuis le tournant du nouveau millénaire en Amérique du Nord (Kecojevic *et al.*, 2007; Ural et Demirkol, 2008; Smets *et al.*, 2010; Ruff *et al.*, 2011).

Ces faits soulèvent la nécessité de mieux comprendre les facteurs et les conditions pouvant mener à une implantation d'innovation réussie. Puisque l'arrivée d'un nouvel équipement n'est pas garant de succès, tant sur l'aspect productivité que sur la SST, quels facteurs peuvent avoir un effet de levier entre innovation, productivité et SST ? La présente recherche se penche sur cette question qui vise précisément l'identification de ces facteurs clés pour une implantation d'équipements innovants réussie.

6.2 Méthodologie

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur la gestion de l'innovation minière. Nous en avons déjà identifié près d'une vingtaine dans une revue de littérature récente (Boudreau-Trudel *et al.*, 2012). Toutefois, lesquels sont les plus importants, les plus pertinents pour une implantation réussie n'a pas été démontré. Pour répondre à ce questionnement visant l'identification de ces facteurs clés pouvant jouer un rôle sur la performance des projets d'équipements miniers innovants nous proposons la combinaison de deux approches d'aide à

la décision. Dans un premier temps, nous avons utilisé l'analyse multiattribut classique de type **AXE** où:

A est un ensemble fini de projets d'équipements innovants a_i pour $i = 1, 2, \dots, n$;

X est un ensemble d'attributs X_k pour $k = 1, 2, \dots, m$;

E est l'ensemble des évaluations des projets d'équipements innovants $e[(a_i), k]$ pour chaque projet d'équipement innovant a_i , en respect de l'attribut X_k .

Cette analyse multiattribut consiste donc à évaluer un ensemble de projets d'équipements innovants où les projets sont évalués individuellement sur chaque attribut (facteur pouvant avoir une influence). Dans un deuxième temps, puisque notre objectif est d'identifier les attributs pertinents pour une implantation réussie, nous avons ajouté à ce modèle des attributs décisionnels représentés par des indicateurs de performance, tel qu'utilisé dans l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance (*dominance-based rough set approach*) (Greco *et al.*, 2001; Zaras, 2004). Nous avons privilégié cet outil d'intelligence artificielle, puisqu'il permet la déduction à partir d'exemples, de règles de décision du genre : « **si... alors...** ». Ces règles identifient donc simultanément les attributs les plus pertinents ainsi que les seuils critiques de ces attributs afin d'obtenir telle catégorie de résultats sur un attribut décisionnel (indicateur de performance). Pour obtenir ces règles, nous devions construire une table de décision comme celle du Tableau 6.1.

Tableau 6.1 Table de décision

	X₁	...	X_m	D
a_1	$e[(a_1),1]$	...	$e[(a_1),m]$	$e(a_1) = \{1, 2, 3 \text{ ou } 4\}$
a_2	$e[(a_2),1]$	...	$e[(a_2),m]$	$e(a_2) = \{1, 2, 3 \text{ ou } 4\}$
...
a_n	$e[(a_n),1]$	...	$e[(a_n),m]$	$e(a_n) = \{1, 2, 3 \text{ ou } 4\}$

Dans cette table (Tableau 6.1), les exemples (a_1, a_2, \dots, a_n) correspondaient aux projets d'équipements miniers innovants tel qu'identifié dans le modèle multiattribut AXE. Dans notre étude, de concert avec les dirigeants d'une minière souterraine québécoise, nous avons sélectionné un échantillon de dix projets. En fait, ces projets représentent l'ensemble des projets d'équipements innovants ayant été implantés depuis 2005 chez la minière participante. Ceux-ci sont présentés succinctement à la section 6.3.

Ensuite, chacun de ces projets a été évalué sur chacun des attributs provenant du modèle AXE. Dans notre table de décision (Tableau 6.1), ces attributs correspondent aux attributs conditionnels (X_1, \dots, X_n). Rappelons que ces attributs conditionnels sont les facteurs contextuels pouvant avoir une influence sur le succès de l'implantation des projets. La liste des facteurs qui ont été considérés pour notre étude, de même que les différentes catégories d'évaluation, sont présentées à l'annexe VI¹³. Pour obtenir ces évaluations, nous avons procédé à des entrevues semi-dirigées. Onze individus de différents niveaux hiérarchiques, allant du mineur-opérateur jusqu'au surintendant de la mine, ont ainsi été interrogés afin d'obtenir leur évaluation de chacun des projets sur chacun des attributs conditionnels. Pour sélectionner ces individus, ceux-ci devaient être présents au moment de l'implantation et y avoir joué un rôle, soit en tant qu'utilisateur, formateur, superviseur ou surintendant. Les individus répondants à ce critère ont ensuite été interrogés sur une base volontaire. Nous n'avons eu aucun non-répondant et les entrevues ont été effectuées par l'équipe de recherche au site de la mine participante.

Finalement, chaque projet a été évalué sur une échelle de performance, selon un attribut décisionnel (colonne D du Tableau 6.1), c'est-à-dire en regard d'un indicateur de performance donné. Dans notre étude, nous avons utilisé trois indicateurs de performance en productivité

¹³ Les facteurs présentés à l'annexe VI sont ceux présentant une variabilité au niveau des évaluations de projets. D'autres facteurs, tels la formation et l'implication des utilisateurs dans la conception, ont été considérés, mais ne présentaient pas de variabilité chez les différents projets étudiés.

(le coût par mètre foré¹⁴, le coût par heure d'utilisation et le ratio de disponibilité) et un indicateur de performance en SST (taux de fréquence des accidents). En plus d'être reconnus dans le secteur minier (Karmis, 2001; Coleman et Kerkering, 2007; Chadwick, 2008; Ural et Demirkol, 2008; Horberry *et al.*, 2011; MSHA, 2013), le choix de ces indicateurs a été approuvé par l'entreprise participante. Les mesures de performance de ces indicateurs ont été prises sur une période de douze mois afin de contrer les biais pouvant résulter d'écart entre les saisons, en particulier au niveau de la SST alors que la contrainte thermique s'accentue en saison chaude (Dessureault et Doucet, 2003). Chaque projet d'innovation a ainsi été comparé avec le groupe d'équipements qui était utilisé avant l'arrivée de l'innovation, toujours sur une période de douze mois. Deux précédentes recherches ont déjà permis de mesurer ces impacts: voir (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a) pour la productivité et voir (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014b) pour la SST. À partir des résultats de ces précédentes recherches, nous avons construit des échelles de performance pour chaque indicateur de performance utilisé pour la présente étude. Ces échelles, sous forme d'échelons à préférence croissante, sont présentées au Tableau 6.2.

Une fois l'ensemble des projets évalués sur chacun des attributs conditionnels (facteurs contextuels) et décisionnels (indicateurs de performance), il a été possible d'extraire les règles de décision à partir de la table de décision ainsi complétée. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel jMAF (Blaszczyński *et al.*, 2013) qui est un logiciel spécialisé pour les calculs de relation de dominance provenant du *Laboratory of Intelligent Decision Support Systems* (LIDSS) de l'*Institute of Computing Science* de la *Poznan University of Technology* (LIDSS, 2014).

¹⁴ L'indicateur du coût par mètre foré fût utilisé seulement pour les projets de boulonneuses et de foreuses, soit les projets 1, 1.5, 2 et 3.

Tableau 6.2 Échelles de performance des attributs décisionnels

Indicateur \$/m foré		Indicateur \$/heure	
Valeur d'attribut	Amélioration de l'indicateur (en %)	Valeur d'attribut	Amélioration de l'indicateur (en %)
1	Nulle - < 0	1	Faible - [0 -25[
2	Faible - [0 - 25[	2	Moyenne - [25 - 50[
3	Moyen - [25 - 50[	3	Élevée - [50 et +
4	Élevé - [50 et +		
Disponibilité		Taux de fréquence des accidents	
Valeur d'attribut	Amélioration de l'indicateur (en %)	Valeur d'attribut	Amélioration de l'indicateur (en %)
1	Nulle - < 0	1	Détérioration significative - [50 et +
2	Faible - [0 - 3[	2	Faible détérioration -]0 - 50[
3	Moyenne - [3 - 6[	3	Statu quo [0]
4	Élevé - [6 et +	4	Faible amélioration -]0 - 50[
		5	Amélioration significative - [50 et +

6.3 Description des projets sous étude

Les dix projets qui ont été étudiés dans le cadre de notre recherche sont présentés au Tableau 6.3.

Le projet 1 correspond à l'introduction en 2010 d'une boulonneuse semi-automatisée qui a provoqué un changement majeur dans le mode d'exécution de la tâche de l'opérateur. En effet, celui-ci est dorénavant assis dans une cabine fermée munie d'air climatisé d'où il dirige les deux bras de l'équipement à l'aide d'une manette. Alors qu'avant l'arrivée de cette nouvelle boulonneuse, l'entreprise utilisait deux types de boulonneuses conventionnelles, c'est-à-dire avec plates-formes de travail accessibles par escaliers d'où le travailleur devait manipuler et installer les grillages. Ces deux types de boulonneuses ont servi de groupes comparatifs pour notre étude, d'où l'ancien groupe 1 et l'ancien groupe 1.5 contenant respectivement 7 et 2 véhicules.

Tableau 6.3 Projets sous étude

	Type d'équipement	Coût unitaire (\$)	Véhicules dans le groupe innovation	Véhicules dans le groupe ancien
Projet 1	Boulonneuse semi-automatisée	1 M	1	7
Projet 1.5	Boulonneuse semi-automatisée	1 M	1	2
Projet 2	Boulonneuses nouvelle génération	900 K	2	2
Projet 3	Foreuse longue portée pour câbles	1,1 M	1	1
Projet 4	Camions 30 tonnes VS 50 tonnes	800 K	3	10
Projet 5	Camions 50 tonnes VS 30 tonnes	1 M	2	3
Projet 6	CN 8 verges nouvelle génération	1 M	2	6
Projet 7	CN 8 verges avec cab. + A/C	850 K	6	4
Projet 8	Tracteurs superviseurs	55 K	11	9
Projet 9	Tracteurs superviseurs	50 K	9	4
Projet 10	Plates-formes élévatrices ciseaux	360 K	2	8

Le projet 2 correspond à l'arrivée en 2009 de deux boulonneuses de nouvelle génération, mais toujours munies de plates-formes élévatrices. Des améliorations au niveau de la conception devant réduire l'effort physique et la fatigue des travailleurs représentent l'essentiel des différenciations. L'ancien groupe est formé de deux boulonneuse du même modèle, mais ayant été acquise plus de 12 ans avant l'arrivé des nouvelles.

Le projet 3 correspond à l'introduction d'une foreuse long trou électro-hydraulique acquise en 2010. Le comparatif a été effectué avec une foreuse long trou ayant été conçue environ 20 ans avant l'introduction de la nouvelle. Le projet 4 correspond à l'arrivée de trois camions de 30 tonnes en 2010. Ceux-ci sont venus remplacer une partie de la flotte des dix camions de 50 tonnes qui n'ont pas su rencontrer les attentes de productivité. D'ailleurs l'introduction des deux camions de 50 tonnes en 2005, correspond au projet 5. Ceux-ci ont été comparés avec trois anciens camions de 30 tonnes.

Le projet 6 correspond à l'arrivée, en 2009, de deux nouvelles chargeuses-navettes (CN) de 8 verges. L'achat de ces deux CN provenait du besoin de l'entreprise d'augmenter sa flotte de CN afin de pourvoir à sa productivité croissante. Toutefois, le modèle déjà utilisé à la mine étant discontinué, l'entreprise a dû se tourner vers un modèle différent. Celui-ci était muni

d'une nouvelle conception de cabine devant permettre un accès plus facile, une meilleure visibilité, une meilleure efficacité du système d'air climatisé, de même qu'une réduction au niveau sonore. Le projet 7 correspond à l'introduction de six nouvelles CN 8 verges en 2007. L'élément distinctif de ces CN repose dans le fait qu'elles ont été les premières, chez la mine participante, à être munies d'une cabine fermée et air climatisé. Le projet 8 correspond à l'arrivée, en 2010, de 11 nouveaux tracteurs miniers servant aux déplacements des superviseurs sous terre. De faibles modifications différencient ces tracteurs du groupe des anciens. Le projet 9 correspond à l'introduction de neuf nouveaux tracteurs miniers pour superviseurs en 2008. Des différences significatives au point de vue technique séparent les deux groupes comparés. L'ancien véhicule ayant une capacité de chargement (en kg et en personnes) ainsi qu'une puissance (HP) moins élevées. Finalement, le projet 10 correspond à l'arrivée de deux nouvelles plates-formes élévatrices ciseaux en 2010. Certaines améliorations techniques, comme l'ouverture sur le côté et leur vitesse accrue a motivé leur choix.

6.4 Résultats

D'emblée, précisons que les règles présentées dans cette section permettent des approximations à partir des exemples des projets de notre étude. La qualité d'approximation de nos règles fût de 90%, ce qui représente une très bonne qualité puisqu'elles ont permis d'expliquer correctement 90% des résultats obtenus par les projets sur les indicateurs de performance étudiés.

6.4.1 Facteurs clés pour l'amélioration de la productivité

Les règles associées à l'indicateur de performance du \$/m foré sont présentées au Tableau 6.4. Les règles ont donc identifié trois attributs clés pour cet indicateur: l'acceptation du nouvel équipement par les opérateurs, le niveau d'habileté requis pour l'utilisation de l'équipement et le niveau de standardisation du nouvel équipement par rapport à l'ancien.

Selon la règle 1, pour obtenir une valeur d'au moins 4 (amélioration élevée) sur cet attribut décisionnel, un projet devait avoir un niveau d'acceptabilité de la part des opérateurs d'au moins 5 (tous les utilisateurs initiaux ont accepté et adopté le nouvel équipement). Alors que lorsque ce niveau d'acceptabilité ne dépassait pas une valeur de 3 (environ 50 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement), les projets ont, au mieux, obtenu une faible amélioration sur cet indicateur de productivité ($\text{Dec} \leq 2$). Cette dichotomie a également été soulevée chez les deux autres attributs pertinents pour cet indicateur de performance. En effet, les règles 3 et 5 nous informent qu'une amélioration élevée ($\text{Dec} \geq 4$) sur cet indicateur nécessitait respectivement un projet n'ayant aucune habileté spéciale requise ($\text{Habil} \geq 5$) ou encore ayant un niveau de standardisation moyen ou plus élevé ($\text{Standard} \geq 3$). À l'inverse, les règles 4 et 6 précisent respectivement, qu'un niveau d'habileté de 2 ou moins et qu'un niveau de standardisation de 1 ont permis, au mieux, une faible amélioration sur cet indicateur du \$/m foré.

Tableau 6.4 Facteurs clés pour l'indicateur \$/m foré

Règle	Décision ^a	Condition ^b
1	$\text{Dec} \geq 4$	$\text{AcceptOper} \geq 5$
2	$\text{Dec} \leq 2$	$\text{AcceptOper} \leq 3$
3	$\text{Dec} \geq 4$	$\text{Habil} \geq 5$
4	$\text{Dec} \leq 2$	$\text{Habil} \leq 2$
5	$\text{Dec} \geq 4$	$\text{Standard} \geq 3$
6	$\text{Dec} \leq 2$	$\text{Standard} \leq 1$

^a Voir le Tableau 6.2 pour les définitions des échelons de l'attribut décisionnel

^b Voir l'annexe VI pour les définitions des attributs conditionnels et de leurs échelons

Pour l'indicateur du \$/h d'utilisation, les règles sont présentées au Tableau 6.5. On voit que la seule règle (règle 1) qui permet d'obtenir une amélioration élevée ($\text{Dec} \geq 3$) pour cet indicateur de performance, c'est lorsque la qualité de l'espace de travail a obtenu une valeur de 5 (excellente sur tous les aspects). Soulignons que cette règle a permis d'expliquer la performance de quatre projets sous étude. La règle 2, permettant l'explication de cinq projets,

indique que pour obtenir une amélioration au moins moyenne ($Dec \geq 2$) sur cet indicateur, le projet devait satisfaire à deux conditions: avoir un niveau d'habileté requis d'au moins 4 (le niveau d'habileté requis est léger, peut s'acquérir facilement avec un peu de pratique) et une implication des utilisateurs dans l'implantation d'au moins 5 (participation active menant à l'optimisation de l'utilisation du nouvel équipement rapidement). Les règles 3 et 4 identifient respectivement le faible degré d'acceptabilité et la faible qualité du champ de vision pour expliquer une faible amélioration de cet indicateur. Finalement, la règle 5, qui explique le résultat de cinq projets, nous informe qu'une valeur du niveau d'habileté requis ne dépassant pas 4, a permis au mieux une amélioration moyenne sur cet indicateur.

Tableau 6.5 Facteurs clés pour l'indicateur \$/h

Règle	Décision ^a	Condition 1 ^b	Condition 2
1	$Dec \geq 3$	$EspaceTrav \geq 5$	
2	$Dec \geq 2$	$Habil \geq 4$	$ImpUtilImpl \geq 5$
3	$Dec \leq 1$	$AcceptOper \leq 2$	
4	$Dec \leq 1$	$Vision \leq 2$	
5	$Dec \leq 2$	$Habil \leq 4$	

^a Voir le Tableau 6.2 pour les définitions des échelons de l'attribut décisionnel

^b Voir l'annexe VI pour les définitions des attributs conditionnels et de leurs échelons

Les règles identifiant les facteurs clés pour l'indicateur de disponibilité sont présentées au Tableau 6.6. Les règles qui ont permis d'expliquer le plus grand nombre de résultats sont les règles 3, 4 et 9. La règle 3, qui a expliqué le résultat de six projets, spécifie qu'un projet ne nécessitant aucune habileté spéciale a permis d'obtenir une amélioration au moins moyenne ($Dec \geq 3$) pour cet indicateur. Selon la règle 4, ce même échelon de performance ($Dec \geq 3$) a également pu être atteint lorsque le niveau de standardisation du nouvel équipement était d'au moins 4 (faible différence, qu'une ou deux modifications(s) mineure(s) qui a(ont) comme objectif d'améliorer l'exécution de la tâche). Cette dernière règle a permis d'expliquer le résultat de cinq projets. La règle 9, vérifiée par cinq projets, précise qu'un projet ayant eu une valeur maximale à 4 pour l'implication des utilisateurs dans l'implantation (participation

active, mais n'a pas menée à l'optimisation de l'utilisation du nouvel équipement rapidement), a permis au mieux une amélioration moyenne pour cet indicateur de disponibilité. Notons encore une fois qu'un faible niveau d'acceptation des opérateurs n'a mené à aucun gain (règle 5), alors qu'un niveau d'habileté élevé ou difficilement atteignable a permis au mieux une faible amélioration (règle 7).

Tableau 6.6 Facteurs clés pour l'indicateur de disponibilité

Règle	Décision ^a	Condition 1 ^b	Condition 2
1	Dec >= 4	Siege >= 5	EspaceTrav >= 5
2	Dec >= 4	ImpUtilImpl >= 5	ExpPoste >= 1.58
3	Dec >= 3	Habil >= 5	
4	Dec >= 3	Standard >= 4	
5	Dec <= 1	AcceptOper <= 2	
6	Dec <= 1	Vision <= 2	
7	Dec <= 2	Habil <= 2	
8	Dec <= 2	ImpFabImpl <= 3	
9	Dec <= 3	ImpUtilImpl <= 4	
10	Dec <= 3	Siege <= 4	Age <= 35.0

^a Voir le Tableau 6.2 pour les définitions des échelons de l'attribut décisionnel

^b Voir l'annexe VI pour les définitions des attributs conditionnels et de leurs échelons

6.5 Facteurs clés pour l'amélioration du taux de fréquence des accidents

Le Tableau 6.7 présente les règles obtenues pour l'indicateur du taux de fréquence des accidents. Parmi ces règles, la règle 4 est celle qui a permis d'expliquer le plus grand nombre de résultats, soit pour quatre projets. Cette règle affirme que dans le pire des cas, une faible détérioration (Dec >= 2) du taux de fréquence des accidents est survenue lorsque 50% des utilisateurs avaient au moins 6,12 années d'expérience à la mine. Les règles 6, 7, 8 et 10 démontrent qu'un projet qui n'a pas obtenu une évaluation de 5 au niveau de la qualité du siège a permis au mieux un statu quo pour cet indicateur de SST (parfois jumelé à un autre attribut). Alors que les règles 2 et 3 affirment qu'un projet dont la qualité du siège était de 5

et qui était jumelé avec respectivement un niveau d'habileté de 5 et un degré d'acceptabilité d'au moins 4 a permis d'obtenir un statu quo dans le pire des cas.

Tableau 6.7 Facteurs clés pour l'indicateur du taux de fréquence des accidents

Règle	Décision^a	Condition 1^b	Condition 2
1	Dec >= 5	ExpPoste >= 4.3	
2	Dec >= 4	Habil >= 5	Siege >= 5
3	Dec >= 3	AccepOper >= 4	Siege >= 5
4	Dec >= 2	ExpMine >= 6.12	
5	Dec <= 1	AccepOper <= 2	
6	Dec <= 1	Siege <= 2	EspaceTrav <= 4
7	Dec <= 1	Siege <= 4	Age <= 35.0
8	Dec <= 2	Siege <= 2	
9	Dec <= 3	Vision <= 2	
10	Dec <= 3	Siege <= 4	ExpMine <= 5.73

^a Voir le Tableau 6.2 pour les définitions des échelons de l'attribut décisionnel

^b Voir l'annexe VI pour les définitions des attributs conditionnels et de leurs échelons

6.6 Discussion

L'utilisation d'un outil d'aide à la décision a ainsi permis de répondre à notre objectif initial, c'est-à-dire d'identifier les facteurs les plus pertinents lors de l'implantation d'équipements miniers innovants. Du côté des indicateurs en productivité, nos résultats ont identifié le niveau d'acceptation des opérateurs face au nouvel équipement, le niveau d'habileté requis pour utiliser l'équipement ainsi que le niveau de standardisation du nouvel équipement par rapport à l'ancien, comme ayant été les facteurs les plus pertinents et récurrents pour expliquer les résultats des projets sur les trois indicateurs de performance étudiés. Du côté de la SST, la qualité du siège de même que l'expérience des travailleurs à la mine ont été les deux attributs conditionnels les plus souvent soulevés pour expliquer les résultats des projets pour l'indicateur du taux de fréquence des accidents. En adoptant un regard global et systémique, deux facteurs ont été identifiés comme pertinents pour chacun des indicateurs de

performance en productivité et en SST que nous avons étudiés. Il s'agit du niveau d'acceptation des opérateurs face au nouvel équipement et du niveau d'habileté requis pour utiliser l'équipement.

La validité interne de notre recherche est en partie cautionnée grâce à nos mesures effectuées sur une période de douze mois. Cela nous évite en effet certains biais possibles entre les saisons, en particulier en raisons de la contrainte thermique accentuée l'été (Dessureault et Doucet, 2003). Toutefois, rappelons que les résultats de notre étude se limitent à une minière souterraine québécoise. Ceci dit, la validité externe de notre recherche, c'est-à-dire la généralisation de nos résultats vers d'autres sites miniers nécessiterait des recherches futures effectuées auprès d'autres mines. De façon individuelle, toute minière peut adopter notre démarche originale, innovante et rigoureuse afin d'identifier ses propres facteurs clés pour une implantation d'équipements innovants réussie.

Notons également que notre étude a tenu compte exclusivement des opérateurs qui étaient des employés de la mine. Nous n'avons donc pas considéré les accidents associés à la maintenance des équipements ni ceux touchant les travailleurs provenant d'entrepreneurs miniers.

Le manque de certaines données représente une autre limite de notre étude. Comme il est parfois le cas, l'information peut disparaître avec le temps ou tout simplement devenir introuvable. Ce fut le cas pour l'âge, l'expérience et la performance en SST pour les deux projets de tracteurs de superviseurs. Ceux-ci n'étant pas attribués comme les autres véhicules, il fut impossible de colliger ces informations. Également, la performance du projet 5 sur la disponibilité n'a pu être confirmée puisque l'information sur ces années n'était plus disponible.

Malgré une revue de littérature initiale étoffée qui visait l'identification des facteurs susceptibles d'avoir une influence, certains attributs n'ont pu être étudiés. Ce fût le cas avec

l'adaptation comportementale des travailleurs face à l'arrivée des innovations. En effet, comme l'indique la théorie de l'homéostasie du risque (Wilde, 1982, 1988 et 1998), l'humain peut être enclin à faire moins d'efforts en santé et sécurité s'il juge que le risque diminue. L'inverse est aussi vrai, s'il juge que le risque augmente, il prendra alors plus de précautions. Cela s'inscrit dans un processus de régulation (homéostasie) où l'humain fonctionne à risque constant. Cet aspect a été soulevé dans le domaine minier par Lynas et Horberry (2011) qui avancent que l'introduction d'une nouvelle technologie peut mener à un comportement moins sécuritaire chez l'opérateur. Toutefois, il a été impossible pour nous d'évaluer cet aspect pour l'ensemble des utilisateurs et ainsi obtenir des évaluations précises et fiables dans le cadre de notre étude.

Nos résultats rejoignent les propos de Dhillon (2009 et 2010) à l'effet qu'aujourd'hui, les nouveaux équipements miniers sont plus puissants, complexes et sophistiqués. Ces nouveaux équipements exigent donc un niveau d'habileté élevé afin que leur utilisation soit économique, efficace et sans risques. Les résultats de notre étude ont confirmé cette difficulté d'obtenir des gains, tant en productivité qu'en SST, lorsque le niveau d'habileté requis est élevé. En fait, nos résultats ont démontré que lorsqu'aucune habileté spéciale n'était requise pour utiliser le nouvel équipement, il y a eu des améliorations importantes tant en SST qu'en productivité. Par contre, lorsqu'un niveau d'habileté élevé était requis, les gains étaient plus faibles au point de vue de la productivité.

La même observation est également valable lorsque le niveau d'acceptation des opérateurs face au nouvel équipement fût faible. Le fait que les opérateurs aient éprouvé de la difficulté à s'approprier et à adopter le nouvel équipement a entraîné de faibles résultats tant en productivité qu'en SST pour les projets que nous avons étudiés. Ce résultat démontre l'utilité et l'importance des compétences en gestion du changement chez les superviseurs et autres supérieurs hiérarchiques. Ce constat est aussi partagé par une l'étude de Lynas et Horberry (2011) qui recommande justement de mettre l'accent sur le développement des habiletés des superviseurs en matière de gestion du changement.

Nos résultats ont également soulevé une combinaison intéressante formée de la qualité du siège et de l'espace de travail. Ce qui est intéressant c'est le fait que cette combinaison des deux attributs a été identifiée comme pertinente tant pour expliquer la performance en SST (Règle 6 Tableau 6.7) que pour la performance sur l'indicateur de la disponibilité (Règle 1 Tableau 6.6). Bien que la littérature actuelle démontre les problèmes de sièges (Eger *et al.*, 2008) et de conception des cabines dans les véhicules miniers (Roque *et al.*, 2014) nos résultats ont apporté une information supplémentaire. En effet, nos résultats ont démontré que pour obtenir une amélioration de performance élevée, ces deux attributs conditionnels devaient obtenir la plus haute évaluation en fait de qualité (tant individuellement (Règle 1 Tableau 6.5) que leur combinaison (Règle 1 Tableau 6.6)). Puisque ce niveau de qualité fut essentiel pour obtenir des améliorations élevées, il serait intéressant dans le cadre d'une recherche future d'identifier quelles sont les caractéristiques qui font qu'un siège et l'espace de travail obtiennent de tels niveaux d'appréciation.

L'arrivée d'équipements semi-automatisés depuis les années 2000 a permis de réduire ou d'éliminer certaines tâches physiquement exigeantes. Le projet 1 de notre échantillon représente bien cette évolution. Le travailleur n'a plus à manipuler les grillages sur une plate-forme afin d'exécuter sa tâche de boulonnage. Il est maintenant assis dans une cabine fermée avec air climatisé d'où il contrôle, à l'aide d'une manette, les deux bras de sa boulonneuse qui se chargent de manipuler et de tenir en place les grillages. Cette rupture au niveau du mode d'exécution de la tâche fut bénéfique du point de vue de la SST. Toutefois, du côté de la productivité ce fut un tout autre résultat (Boudreau-Trudel *et al.*, 2014a). Les règles nous ont confirmé cette difficulté d'obtenir des améliorations, ne serait-ce que moyennes, dès qu'une ou des modifications transforment une partie du mode d'exécution de la tâche. Ce constat trouve écho dans la littérature avec une théorie popularisée par Christensen (1992) à l'effet que le cycle de vie des technologies suit une courbe en forme de S. Cette théorie prétend que l'arrivée d'une nouvelle technologie prend un certain temps avant de dépasser, voir même simplement atteindre, la performance d'une ancienne technologie à maturité. Une fois la nouvelle technologie bien comprise, la performance de celle-ci augmente rapidement et

permet alors de surpasser la performance de l'ancienne technologie qui a atteint les limites de ses capacités. Ce dépassement provoquera ainsi la désuétude de l'ancienne technologie. Selon cette théorie, les utilisateurs de la nouvelle technologie ont donc besoin de temps pour s'adapter à celle-ci et concrétiser des gains. Nos résultats soutiennent très bien cette théorie, car plus les modifications étaient importantes dans nos projets, plus il fut difficile d'obtenir rapidement des gains en productivité. Il reste cependant à confirmer si cette nouvelle technologie permettra de dépasser la performance de l'ancienne.

L'âge des opérateurs n'a pas été un facteur pertinent selon nos résultats, contrairement à ce qu'avancent Ural et Demirkol (2008). Par contre, leur expérience a joué un rôle clé, surtout du côté de la SST. Autant l'expérience sur le poste que l'expérience à la mine ont été identifiés comme des attributs pertinents sur l'amélioration du taux de fréquence des accidents. Ce résultat est supporté par les conclusions d'une autre étude (Groves *et al.*, 2007) qui met de l'avant l'importance de l'expérience chez les mineurs. Dans leur étude, ces auteurs ont analysé les accidents reliés aux véhicules miniers survenus aux États-Unis entre 1995 et 2004, et dans plus de 50 % des cas, les travailleurs avaient moins de 5 ans d'expérience. Dans notre recherche, les seuils critiques pour les attributs de l'expérience variaient justement entre 4 et 6 années pour l'indicateur en SST que nous avons étudié.

6.7 Conclusion

La principale contribution de cet article est l'identification précise des facteurs clés pour une implantation d'équipements miniers innovants réussie tant en SST qu'en productivité chez la mine participante. Parmi la vingtaine de facteurs contextuels qui ont été évalués, le niveau d'habileté requis et le niveau d'acceptation des opérateurs ont été identifiés comme les plus pertinents sur la totalité des indicateurs de performance. En plus de ces facteurs, la qualité du siège et l'expérience des opérateurs se sont également montrées pertinentes pour expliquer les résultats en santé et sécurité, alors que le niveau de standardisation du nouvel équipement s'est avéré également pertinent pour expliquer les résultats du côté de la productivité.

L'identification de ces facteurs clés aidera les dirigeants de la mine participante dans leur gestion d'équipements miniers innovants. Les facteurs clés, ainsi que leurs seuils critiques, identifiés dans cette recherche méritent donc une attention distincte et précieuse. Nos résultats aiguilleront ainsi l'entreprise vers les caractéristiques des facteurs clés pouvant mener au succès du double défi qu'est l'augmentation de la productivité et l'amélioration de la santé et sécurité des travailleurs lors de l'implantation d'équipements miniers innovants.

CONCLUSION

Les travaux de cette thèse devaient répondre à deux objectifs précis. Dans un premier temps, on souhaitait avoir une meilleure compréhension de l'impact de l'équipement innovant en termes de productivité et de SST pour les entreprises minières souterraines de l'A-T. Dans un deuxième temps, nous voulions identifier les facteurs favorisant l'implantation de ces équipements innovants.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons privilégié l'étude de cas comme méthode de recherche. Cette étude de cas a été réalisée dans une mine aurifère souterraine abitibienne. Dix projets d'équipements miniers innovants ayant été implantés dans cette mine ont été identifiés afin de composer notre échantillon. Afin de mesurer l'impact de l'équipement innovant et ainsi répondre à notre premier objectif, nous avons procédé par étude exploratoire. Alors que pour identifier les facteurs clés lors de l'introduction d'innovations, nous avons opté pour l'étude explicative par l'entremise de l'utilisation d'un outil d'aide à la décision multiattribut.

Les éléments de réponse au premier objectif ont été présentés et décomposés en deux volets distincts. En premier lieu, l'impact de l'équipement innovant sur la productivité a été mesuré par trois indicateurs de performance reconnus dans le domaine minier: le coût par mètre foré, le coût par heure d'utilisation et le ratio de disponibilité (chapitre 4). La performance de chacun des dix projets innovants sur ces indicateurs a été comparée avec la performance des anciens équipements équivalents. Nos résultats, basés sur des données objectives sur une période de douze mois, démontrent clairement que l'introduction d'équipements innovants n'engendre pas automatiquement d'amélioration sur la productivité. Dans certains cas, la performance sur ces indicateurs était même meilleure avant l'introduction du nouvel équipement, et ce, malgré le coût considérable relié à son achat. En fait, sur l'ensemble des indicateurs de productivité, 40% des projets n'ont pas permis d'amélioration significative.

Cette incertitude de succès solidifie l'intérêt de notre recherche quant à l'identification des facteurs clés permettant une implantation réussie en termes de productivité.

En deuxième lieu, l'impact de l'équipement innovant sur la performance en SST a été mesuré par l'indicateur du taux de fréquence des accidents (chapitre 5). La performance des projets innovants sur cet indicateur a été comparée avec la performance des anciens équipements équivalents, toujours sur une période de douze mois. De la même façon que nos résultats en productivité, ceux sur le taux de fréquence des accidents ont clairement démontré que l'introduction d'équipements innovants ne permet pas automatiquement de gains sur cet indicateur de performance. Ce constat fut observé même lorsque la motivation première de l'acquisition du nouvel équipement était l'amélioration des conditions de travail. L'exemple des premières CN avec cabine fermée et air climatisé a démontré que leur introduction a plutôt amené de nouveaux éléments de risque pour les travailleurs. Ces nouveaux éléments de risque proviennent de faiblesses ergonomiques dans la conception des cabines des nouveaux véhicules.

La recension des écrits présentée au chapitre 3, est le préambule nécessaire au chapitre 6 qui répond à notre deuxième objectif. Cette recension des écrits a permis d'identifier près de vingt facteurs susceptibles d'avoir un effet de levier sur la performance en productivité et en SST lors de l'introduction d'équipements miniers innovants. Cet état de l'art a également permis de confirmer le manque d'information sur l'importance relative de ces différents facteurs, de même que sur leurs interactions. La mise en lumière de cet écueil consolide encore une fois l'importance de notre problématique.

Chacun des dix projets d'équipements innovants de notre échantillon a ensuite été évalué sur l'ensemble des facteurs identifiés depuis la revue de littérature. Ces évaluations, jumelées aux performances des projets sur les quatre indicateurs de performance étudiés (chapitres 4 et 5) ont permis la construction d'une table de décision telle qu'utilisée dans l'approche des ensembles approximatifs basés sur la dominance. Grâce à cet outil d'aide à la décision

multiattribut, qui provient de la famille de l'intelligence artificielle, il a été possible d'identifier simultanément les facteurs les plus pertinents, de même que les seuils critiques de ces facteurs, afin d'expliquer la performance des projets de notre étude (chapitre 6). L'identification de ces facteurs et de leurs seuils a été réalisée par l'entremise de règles de décision du type "**si ..., alors...**". Ces règles ont donc permis d'identifier la ou les conditions nécessaires pour obtenir tel résultat sur chaque indicateur de performance étudié aux chapitres 4 et 5.

Pour l'ensemble des indicateurs de performance (le coût par mètre foré, le coût par heure d'utilisation, le ratio de disponibilité et le taux de fréquence des accidents), deux facteurs ont été identifiés comme les plus pertinents pour expliquer les résultats des projets. Ces deux facteurs sont le niveau d'habileté requis pour maîtriser la technologie et le niveau d'acceptation de cette dernière de la part des opérateurs. À ceux-ci s'ajoutent d'autres facteurs lorsque l'on analyse la performance des indicateurs en productivité et en SST de façon distincte. En effet, du côté de la productivité, le niveau de standardisation du nouvel équipement s'est également montré pertinent pour expliquer les résultats de ces indicateurs. Alors que la qualité du siège et l'expérience des opérateurs se sont avérées pertinentes pour expliquer les résultats en santé et sécurité du travail.

Les travaux de cette thèse se sont donc montrés féconds pour répondre aux deux objectifs établis initialement. Nous avons démontré l'impact en productivité (chapitre 4) et en SST (chapitre 5) des équipements innovants pour une mine souterraine abitibienne. Par la suite, nous avons identifié les facteurs clés pour une implantation d'équipements innovants réussie (chapitre 6).

Les conclusions de nos travaux, en particulier l'identification des facteurs de succès, représentent une information précieuse pour l'entreprise minière participante. Ces facteurs, que l'on peut considérer comme les chevaux de bataille des gestionnaires, doivent obtenir une attention particulière lors de l'introduction d'équipements innovants.

Finalement, nous avons contribué à l'élaboration d'une méthode innovante, rigoureuse et applicable à chaque entreprise minière souterraine abitibienne. L'utilisation de notre méthode par ces entreprises leur permettrait d'identifier leurs propres facteurs de succès découlant de leur propre environnement. Face à ses facteurs clés, l'entreprise est en mesure d'identifier ses besoins pour que l'implantation d'équipements innovants ait le potentiel de générer une amélioration de la performance en productivité et en SST.

RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats de cette thèse, nous considérons que la méthode proposée ainsi que les informations concernant l'impact et les facteurs clés de l'introduction d'équipements innovants sur la performance en productivité et en SST constituent des retombées importantes tant pour le milieu industriel que scientifique. Ceci est d'autant plus vrai avec le ralentissement auquel est récemment confronté le domaine minier. Toutefois, nous sommes conscients que nos travaux présentent certaines limites. Dans une démarche fidèle à notre approche constructiviste, nous proposons ci-après quelques recommandations et pistes de recherches futures afin d'atténuer ces limites et ainsi élargir le champ d'influence de nos travaux.

Les indicateurs de performance pour notre étude sur l'impact en productivité (chapitre 4) ont été limités au nombre de trois: le coût par mètre foré, le coût par heure d'utilisation et le ratio de disponibilité. Le premier a permis de mesurer la performance seulement pour les projets de boulonneuses et de foreuses, alors que les deux derniers ont été utilisés pour l'ensemble des projets. Bien que ces indicateurs soient reconnus dans le milieu (Chadwick, 2008; Horberry *et al.*, 2011), d'autres indicateurs spécifiques à certains types de projets permettraient une analyse encore plus fine de la situation. Par exemple, pour les projets de camions à benne, l'indicateur du nombre de tonnes transportées permettrait d'enrichir l'évaluation de la performance pour ce type de projet (Bartos, 2007; Sari *et al.*, 2009).

La même limite existe pour l'évaluation de la performance en SST. Tel que discuté au chapitre 5, d'autres indicateurs que celui du taux de fréquence des accidents existent, même si l'utilisation de celui-ci est appuyée par une littérature abondante (Coleman et Kerkerling, 2007; Ural et Demirkol, 2008; MSHA, 2013). À ce titre, l'utilisation du taux de sévérité des blessures (Coleman et Kerkerling, 2007; Groves *et al.*, 2007) permettrait d'étudier si l'introduction d'équipements innovants a permis un changement dans la nature des blessures, c'est-à-dire si les blessures sont moins ou plus sévères en termes de journées d'absence chez

les accidentés. De plus, notons que notre étude s'est limitée aux accidents touchant les opérateurs. Nous n'avons donc pas considéré les accidents chez les employés d'entrepreneurs miniers, de même que les accidents survenus lors de réparation ou de maintenance. Toutefois, il pourrait être pertinent d'élargir le concept de performance en SST des projets d'équipements innovants en intégrant ces acteurs dans une recherche subséquente. Dans un tel cas, nous conseillons de distinguer les groupes de travailleurs afin d'obtenir des mesures de performance distinctes selon le type de travailleurs afin d'analyser les différences s'il y a lieu.

L'identification des facteurs clés est basée sur une revue de littérature qui a permis de recenser les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur le succès de l'implantation d'équipements innovants (chapitre 3). Cependant, certains de ces facteurs n'ont pas pu être évalués par faute d'absence de données. Ce fut le cas avec l'atmosphère dans les équipes de travail, de même qu'avec l'accessibilité des bonus. Dans le cas du premier, nous avons été confrontés à plusieurs contraintes, telles que la rotation de la main-d'oeuvre, les fluctuations de la qualité des relations au cours d'une année (période que nous avons utilisée) et les différences entre les diverses équipes de travail. L'approfondissement de ces éléments pourrait toutefois s'avérer fort intéressant dans le cadre d'une recherche future. En ce qui concerne les bonus, il est connu que ceux-ci sont très importants pour les mineurs (Beaupré, 2011). Par contre, suite à nos observations du terrain, nous nous sommes aperçus que pour obtenir une mesure fiable de ce facteur, une étude dédiée exclusivement à celui-ci serait nécessaire compte tenu de la sensibilité du sujet.

Par ailleurs, nous reconnaissons le fait que malgré notre recension des écrits, d'autres facteurs que ceux étudiés peuvent avoir une influence sur le succès de l'implantation. Tel que nous l'avons soulevé au chapitre 6, l'adaptation comportementale des travailleurs face à l'arrivée des innovations est l'un de ces facteurs potentiels. Il serait en effet intéressant d'étudier plus en détails l'impact de la théorie de l'homéostasie du risque (Wilde, 1982, 1988 et 1998) lors de l'introduction d'équipements innovants.

Les observations du terrain nous ont également permis de soulever quelques recommandations. L'une de ces recommandations concerne l'identification des dangers entourant le nouvel équipement. Les réponses obtenues lors de nos entrevues nous permettent de confirmer que l'évaluation des risques inhérents aux équipements n'est pas une pratique en vigueur, et ce, malgré la riche littérature traitant de l'importance du sujet (Kecojevic *et al.*, 2007; Dhillon, 2009; Karmis, 2001). Les évaluations de risques sont plutôt centrées sur les postes de travail et non pas sur l'équipement. Toutefois, pour un même poste, l'équipement peut être différent et avoir différents éléments de risque. C'est le cas, entre autres, avec les boulonneuses conventionnelles qui n'ont pas les mêmes plates-formes de travail selon le modèle. La différence est encore plus drastique entre la boulonneuse semi-automatisée du projet 1 et les anciennes (conventionnelles à plate-forme), où le mode d'exécution de la tâche est complètement différent, et ce, pour le même poste de boulonneur.

L'étude de cas, tel que nous l'avons utilisé, représente la principale limite à la généralisation de nos résultats à l'ensemble des mines souterraines abitibiennes. Sans recherches semblables menées chez d'autres mines de cette population, il est difficile de généraliser nos résultats sans quitter le domaine des spéculations. Toutefois, notre approche se prête à n'importe quelle minière souterraine désireuse d'identifier ses propres facteurs de succès. Avec de telles recherches supplémentaires, il serait possible de comparer les résultats et retracer les similitudes entre les facteurs pertinents et ainsi solidifier la généralisation des résultats.

La démarche proposée est basée sur l'utilisation d'un outil d'aide à la décision multiattribut. Tel que discuté au chapitre 6, cet outil permet des approximations à partir des projets de l'étude. Bien que nous ayons obtenu une très bonne qualité d'approximation (90%), il est important de rappeler que les résultats proviennent de projets appartenant au passé. Il sera donc nécessaire de valider les résultats de façon périodique puisque l'environnement minier est en constante évolution (Upstill et Hall, 2006). En effet, on peut mentionner comme vecteurs de changement, les caractéristiques de terrain qui changent (contraintes thermiques), la rotation de la main-d'œuvre, les humains impliqués qui évoluent, de même que

l'organisation et les méthodes de travail. Tous ces changements font donc en sorte que les facteurs de réussite d'aujourd'hui ne seront pas forcément les mêmes à court, moyen ou long terme. C'est pourquoi nous conseillons une validation des résultats de façon périodique.

Finalement, notons que l'outil pourrait également servir dans la sélection de l'équipement minier lors de l'achat de celui-ci. En effet, en utilisant le *Net Flow Score* (NFS) tel qu'utilisé dans l'approche PROMETHEE (Brans et Mareschal, 2002), les différents choix possibles d'équipements innovants pourraient être évalués, sous forme de préférence, en regard des différents facteurs pertinents. Ce NFS permettrait ultimement d'obtenir un classement des équipements en fonction d'une évaluation globale sur les facteurs pertinents. Ce complément à notre recherche constitue donc une piste de recherche intéressante pour les décideurs des entreprises minières.

ANNEXE I

HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUÉBÉCOISE

Cette section propose un survol de l'historique de l'industrie minière au Québec. Nous dresserons ainsi un court portrait des faits marquants de cette industrie depuis les premières découvertes d'importances jusqu'à la fin du 20e siècle. L'accent pour cette partie sera mis sur les développements technologiques qu'a connus l'industrie minière québécoise au fil du temps.

Origines de l'industrie (1600-1920)

Les débuts de l'histoire minière québécoise, remontent à la découverte de l'Amérique du Nord alors que Jacques Cartier croyait rapporter de ce Nouveau Monde de l'or et des diamants trouvés près du cap Diamant (bien qu'en fait, il s'agissait de pyrite et de quartz).

La découverte du premier gisement de mineraux en importance au Québec, date de 1686 (Ministère des Ressources naturelles, 2013b). Ce dépôt de plomb, situé sur la rive Est du lac Témiscamingue, va cependant sombrer dans l'oubli pendant près de 200 ans avant d'être redécouvert et exploité. Les premières exploitations minières datent des années 1840, lors de la première ruée vers l'or québécoise. C'est donc en 1847 que la toute première exploitation d'or alluvionnaire prend naissance dans la région de la Beauce. C'est également au cours de cette période que l'État provincial s'approprie le sous-sol québécois par diverses mesures législatives et administratives. Quelques années plus tard, vers 1860, une importante exploitation de cuivre et de souffre se met en branle en Estrie, alors que l'on découvre des gisements d'amiante dans le secteur de Thetford Mines un peu avant 1880. Dans un autre ordre d'idées, le Canada voit son premier programme en génie minier offert à l'Université McGill en 1871.

Au XIXe siècle, les techniques de forage sont des plus rudimentaires. Les mineurs descendent dans le puits par des échelles ou encore par un chariot tiré par un monte-charge. Ils s'éclairent à la chandelle de suif qu'ils fixent sur leur chapeau de feutre (Ouellet, 2004). Plus tard viendront les lampes au carbure. Le forage, proprement dit, peut se faire individuellement, en équipe de deux ou encore de trois hommes. Lorsqu'il est seul, le travailleur utilise une petite masse d'environ 2 kilogrammes pour frapper une tige de foret d'environ 30 cm qu'il tient lui-même. Dans une équipe de deux hommes, le premier frappe avec une masse de près de 4 kilogrammes la tige de foret qui est tenue et tournée dans le trou par le deuxième. Quelques fois, un troisième ouvrier est ajouté, également avec une masse d'environ 4 kilogrammes afin d'augmenter la rapidité de forage (Graham et Evans, 2007a). Avant que la dynamite ne fasse son apparition dans les années 1890, des poudres explosives sont utilisées. La dynamite est sans équivoque plus sécuritaire et plus efficace que ces poudres explosives qui s'avèrent très dangereuses.

Au tournant du siècle, les mineurs voient l'arrivée des foreuses à air comprimé. Bien que cet appareil soit large et peu maniable, il augmentera considérablement la productivité du domaine comparativement au forage manuel (Graham et Evans, 2007b). Cependant, l'utilisation de cet outil produit une fine poussière qui pénètre les poumons, s'y accumule et provoque ultimement la silicose. D'ailleurs, Vallières (1989) affirme que les mineurs surnomment ces foreuses, à juste titre : *widow-makers*. Avant l'arrivée des chevaux-vapeurs, des chevaux et des mûles sont utilisés afin d'haler le minerai extrait à la surface. Ceux-ci, complètement paralysés par la peur, sont descendus en étant suspendus verticalement à un câble et envoyés doucement au fond du puits. Une fois descendus, ils y restaient jusqu'à leur mort. Dû à l'absence de lumière et à la forte quantité de poussière, ces animaux devenaient aveugles, tandis que les détonations les rendaient sourds. En plus d'être une force indispensable pour les travailleurs, ces animaux représentaient un bon moyen de protection, puisqu'ils sentaient le danger et refusaient de s'engager dans une galerie qui menaçait de s'effondrer (Labrecque, 2001). D'autres cas relatent l'introduction de rats sous terre (puisque'ils semblaient sentir les tremblements de terre avant les humains). Lorsque ceux-ci

sortaient massivement et en vitesse d'un couloir, les mineurs devaient les imiter rapidement (Mines Capelton, 2007). Le serin en cage, dont l'image est le symbole internationalement reconnu du Jour de deuil, était également utilisé pour la détection des coups de grisou et autres dangers présents dans l'air et difficilement repérables par l'humain (comme le monoxyde de carbone). Lorsque le serin, qui est plus sensible aux dangers présents dans l'atmosphère et à l'absence d'oxygène que les hommes, était terrassé au fond de sa cage, c'est parce qu'il était temps de remonter à la surface pour les travailleurs, s'il n'était pas déjà trop tard (Syndicat canadien de la fonction publique (SCFP), 2009).

L'avènement du moteur à vapeur, puis de l'électricité viendra encore une fois améliorer l'efficacité de ce domaine au niveau du transport, en particulier. De plus, l'exploitation sur une grande échelle par des entreprises britanniques et américaines contribue à l'augmentation de la production, mais également à la hausse des coûts d'immobilisations par l'avènement de nouvelles techniques de production. Ceci provient du fait que les carrières s'approfondissent et demandent alors une machinerie de plus en plus spécialisée (pompes et grues à vapeur par exemple).

Dans les mêmes années, en 1906, le premier gisement d'or de la région de l'Abitibi-Témiscamingue est découvert sur le bord du lac Fortune. Toutefois, la région devra attendre le jalonnement de claims jumelé à la découverte d'un gisement de cuivre et d'or au nord du lac Tremoy avant de devenir un véritable camp minier en 1922. C'est à partir de cette date que l'industrie minière deviendra prépondérante dans le portrait industriel québécois. Cette croissance arrive au même moment qu'une expansion industrielle majeure (Faucher et Lamontagne, 1953)¹⁵. Le Québec devient alors un chef de file dans la desserte de minerais dans les régions les plus industrialisées de l'Amérique du Nord.

¹⁵ Cette expansion débuta avec l'émergence de ce que Faucher et Lamontagne (1953) appellent les industries jumelles, celles de la production d'énergie hydroélectrique et de la

Épanouissement de l'industrie (1920-1950)

Dans les années 1920-1930, l'Abitibi-Témiscamingue compte pas moins de 90 % des titres miniers enregistrés au Québec (Ministère des Ressources naturelles, 2013b). Les types de minéraux qui sont exploités au cours de cette période sont le cuivre, l'or, le fer et l'amiante. Soulignons que l'industrie minérale québécoise connaîtra deux « boums » miniers importants qui provoqueront la mise en exploitation de nombreuses mines. Le premier, entre 1922 et 1945 a mené à la découverte de gisements de surface par des prospecteurs utilisant des méthodes traditionnelles, c'est-à-dire à la main. Ce premier « boum » est encouragé par la forte demande de métaux animée par la Seconde Guerre Mondiale. Ce conflit qui nécessite une demande exceptionnelle d'armements, de navires et d'avions provoque une forte demande sur l'acier, les métaux non ferreux et les produits chimiques. En plus de la demande qu'elle génère, les technologies utilisées pour la guerre deviennent accessibles. Parmi celles-ci notons, l'avion et le magnétomètre qui facilitent grandement le travail d'exploration (Cranstone, 2002).

Parallèlement à ce temps de guerre, les foreuses au diamant deviennent de plus en plus utilisées dans les années 1920 et elles seront bientôt un allié indispensable à l'industrie minérale entière. Durant cette même période, l'industrie automobile en plein essor, crée une demande importante pour les métaux d'alliage qu'elle utilise. La fenêtre des années 1920 et 1950 est le théâtre du développement de la machinerie mécanisée : les premiers chargeurs remplacent les tracteurs, les grattoirs (scrapers) sont introduits sous terre, les camions à benne font leur entrée, alors que la transmission automatique sur les véhicules hors route est introduite (MMSD, 2002). Toutes ces innovations technologiques améliorent considérablement la versatilité et la productivité dans le milieu minier.

pâte à papier. Suivirent par la suite l'industrie de l'aluminium, l'industrie minière, l'industrie chimique et l'industrie aéronautique.

Après-guerre et l'ère de l'informatique (1950-aujourd'hui)

Le deuxième « boum », entre 1955 et 1965, mena à l'exploitation de plusieurs sites. Ce « boum » est la résultante de l'avènement de la géophysique aéroportée qui a permis la découverte de gisements cachés, comme ceux de sulfures massifs de zinc et de cuivre à Matagami et Joutel. Ces nouvelles technologies (avions et hélicoptères équipés de systèmes électromagnétiques) ont également permis le développement du secteur de Chapais-Chibougaumau plus au nord-est de l'Abitibi-Témiscamingue (Vallières, 1989). C'est également dans les années 1950 que l'utilisation de l'hydraulique est apparue. L'avènement de cette puissance a permis des augmentations majeures dans la capacité de chargement (une hausse de capacité passant de moins de trente (30) tonnes jusqu'à cent cinquante (150) tonnes) (MMSD, 2002). Les décennies qui ont suivi l'après-guerre ont aussi permis des avancées importantes au niveau des explosifs. La dynamite a été doucement, mais complètement, remplacée par le gel explosif. Celui-ci étant beaucoup plus sécuritaire que son prédecesseur.

Les deux dernières décennies du XXe siècle ont connu une évolution rapide et continue au niveau de l'ingénierie, du matériel, de la fabrication et de la technologie informatique. Cette ère débute avec l'introduction du microprocesseur dans les années 1980. Cette innovation a généré une puissance de calcul jamais vue auparavant. Cet outil technologique a été bénéfique à tous les niveaux de l'organisation (exploration et exploitation) et dans toutes ses activités (comme le forage de même qu'en santé et sécurité du travail) (MMSD, 2002). La dernière décennie de ce siècle a joué d'outils informatiques et de logiciels plus perfectionnés et d'une capacité de communication plus étendue ce qui permet dorénavant d'échanger et d'intégrer des données et des informations. Par ailleurs, les avancées vidéographiques et les technologies au niveau des capteurs ont permis un contrôle et une gestion en temps réel des unités et des opérations en continu.

Nous pouvons mentionner qu'au cours de la dernière décennie il y a eu des avancées significatives dans la compréhension de la formation des gisements ainsi que dans l'exploration à de plus grandes profondeurs (par exemple, LaRonde à Cadillac). La prochaine vague d'améliorations déroulera d'innovations en énergie. Certaines recherches actuelles se concentrent d'ailleurs sur la mise au point de véhicules miniers souterrains munis sans carburant diesel. Leur mode de propulsion : la pile (à hydrogène entre autres). Cette innovation permettra peut-être ainsi une réduction des émanations de diesel nocives, une réduction du bruit, mais également une réduction considérable des coûts reliés à la ventilation (Paradis, 2003).

Cette période a également bénéficié de l'introduction de l'équipement automatisé. Cette innovation particulière, est détaillée dans le chapitre 1 de la thèse.

Pour conclure cette partie sur l'historique de l'industrie minière, nous pouvons affirmer que les développements dans les secteurs de l'exploration, de l'exploitation minière et du traitement minéral se sont faits en cohérence avec les développements techniques et administratifs de la société moderne. Depuis le milieu des années 1800, l'extraction et le traitement minéral ont évolué de façon continue. Les emplois de ces secteurs demandaient initialement un effort physique extrêmement exigeant, puis, au fil des ans, l'effort physique exigé s'est réduit et ce, en étant conduit par les avancements technologiques réalisés dans tous les aspects et toutes les facettes de l'opération minière. Les changements technologiques reflètent la croissance industrielle et la révolution dans le transport au tournant du XXe siècle. Ces innovations ont fourni tant les stimuli que les moyens de faire de l'exploitation minière une activité économiquement réalisable (MMSD, 2002). Les premières avancées furent celles reliées aux améliorations mécaniques, suivies par les avancées en physique et en chimie et dernièrement, par les avancées touchant la technologie de l'information ainsi que la robotisation. Mentionnons que les avancées fondamentales dans ces champs étaient souvent initiées à l'extérieur du secteur de l'exploitation minière avant d'être adaptées par cette industrie (par ex. le moteur à vapeur utilisé pour le pompage de l'eau). Malgré de belles

améliorations techniques du point de vue de la productivité, nous avons vu qu'elles apportent parfois de nouveaux éléments de risque pour les travailleurs miniers.

ANNEXE II

HISTORIQUE DE LA SST DE L'INDUSTRIE MINIÈRE QUÉBÉCOISE

Cette annexe développe un bref historique des éléments marquants de la performance en santé et en sécurité du travail dans le domaine de l'extraction minérale. De telles données historiques ne sont pas facilement accessibles dû principalement au peu d'écrits au fil des temps sur ce sujet. Par contre, l'ouvrage de Vallières (1989) intitulé « Des mines et des hommes », qui est l'un des seuls à avoir réalisé l'exploit colossal de dresser un bilan historique fût, sans contredit, une riche source d'informations pour cette section. Tout comme il a été question dans l'historique de l'annexe précédente, le lecteur verra que la performance en SST semble quelques fois liée à l'introduction de nouvelles technologies dans les procédés ou encore avec la nouvelle machinerie introduite sous terre. Ce lien semble parfois positif et parfois négatif.

Industrialisation

L'un des premiers rapports sur les accidents dans l'industrie minière québécoise est effectué en avril 1888 par la Commission royale d'enquête sur les rapports entre le capital et le travail (CRERCT)¹⁶. Ce rapport qui vise les mines Eustis et Capelton, fournit des informations très révélatrices sur les conditions de vie et de travail des mineurs et autres employés de cette époque. La Commission se penche sur les risques d'accidents, spécialement lors de la manipulation d'explosifs. De nombreux accidents surviennent lorsque des explosifs n'éclatent pas et que les travailleurs doivent les retirer en enlevant la poudre (Vallières, 1989). Rappelons qu'à cette époque les mineurs s'éclairent à la chandelle, les risques étaient d'autant plus importants. Toutefois, l'origine la plus fréquente d'accidents est celle de la

¹⁶ Canada. 1889. Rapport de la Commission royale d'enquête sur les rapports entre le capital et le travail (CRERCT). Témoignages, Québec, Partie I, Ottawa : Imprimeur de la reine, p. 1 402 – 1 421.

chute de pierre dans les puits et les galeries souterraines. Habituellement, des moyens sont pris pour supporter les plafonds de galeries. Ces moyens consistent en une vérification périodique par les ouvriers de la solidité en tâtonnant les plafonds et les parois pour y dégager les blocs instables que les explosifs et forages ébranlent continuellement. Un autre risque qui provoque de nombreux accidents est celui des monte-charges. Lorsque ceux-ci connaissent un bris en cours de montée, rien ne peut arrêter leur descente qui peut s'avérer mortelle. C'est pour cette raison que les mineurs préfèrent monter et descendre dans les puits par les échelles. L'image qui se dégage des témoignages démontre que le travail dans les mines est périlleux, dangereux pour la santé et très exigeant physiquement. De plus, les ouvriers n'ont guère de pouvoir de pression alors que l'autorité administrative des compagnies s'impose dans les relations patrons-ouvriers tout en assurant une discipline rigoureuse. Et encore, l'organisation sociale et économique des villages tourne autour des entreprises, ce qui accentue la dépendance des travailleurs face à leurs employeurs. Par exemple, dans les villages d'Eutis, Capelton et Albert Mines tout ou presque appartient à la compagnie minière. Les mineurs vivent dans les maisons louées de la compagnie, qui leur vend également le bois de chauffage. Les hommes travaillent sous terre, tandis que les femmes sont au concentrateur.

Les premiers chiffres faisant état du nombre d'accidents au niveau québécois arrivent à partir de 1909 avec les publications par le Service des mines des rapports annuels sur les accidents dans les mines et carrières au Québec. Entre 1909 et 1921, on dénombre entre 10 et 30 accidents mortels par année ainsi que plusieurs centaines de blessés pour une main-d'œuvre permanente (sur la base de 300 jours) de 5 000 à 8 000 environ (Vallières, 1989). Les principales natures de risques sont : écrasement par des blocs qui s'éboulent, le maniement et l'entreposage des explosifs et le transport du minerai du fond des puits vers les ateliers ou les wagons de chemin de fer.

Nous savons par contre que ces types de risques ont été mitigés par l'arrivée de nouvelles technologies. Par exemple, l'arrivée de la pelle mécanique vers la fin des années 1910 et

début 1920 viendra diminuer considérablement les risques d'écrasement par éboulement de blocs. Cet exemple d'innovation avait pour but d'accroître la productivité, tout comme l'introduction de la foreuse à air. Toutefois, comme il a été question précédemment, ce type d'innovation a créé d'autres problèmes; la salubrité des lieux ainsi qu'une fine poussière qui provoque ultimement la silicose chez les travailleurs. Donc, le nombre d'accidents a diminué, mais ces innovations ont transféré les risques vers des maladies professionnelles.

Les innovations acquises lors de la Première Grande Guerre aideront également à diminuer le nombre d'accidents, en particulier pour les accidents reliés aux explosifs. En effet, ceci résulte de l'amélioration des conditions de préservations de même que l'usage du courant électrique dans le tirage des charges. Ces améliorations deviendront réglementées respectivement en 1912 et 1915 suite à la rigueur des inspections et de la volonté de l'État à vouloir modifier les pratiques étiquetées dangereuses.

Finalement, les risques touchant le transport du minerai diminueront par diverses améliorations du système des câbles-grues et par l'arrivée des wagonnets sur voies ferrées dans les années 1910. Ces améliorations se situent au niveau de l'augmentation de la puissance et par le déchargement automatique. Par contre, ces nouveaux moyens de transports ont augmenté les accidents, en particulier lors du déchargement (Vallières, 1989). D'autres accidents surviennent lors du transport de personnes, soit pour cause d'escaliers mal entretenus ou soit glissants. Mentionnons qu'au niveau des ateliers, les multiples courroies, poulies, engrenages et arbres de transmission sont la source de nombreux accidents, que ce soit lors de la mise en marche ou encore lors de leur graissage et entretien. Nous pouvons aussi ajouter le fait que les ouvriers, qui sont à contrat ou encore rémunérés à la pièce (ou à la quantité) sont plus favorables aux accidents, dû à la pression pour l'augmentation de la productivité et ce, aux détriments du temps nécessaire pour la réalisation des activités de prévention. Bref, comme le précise Vallières (1989), d'un point de vue général, la mécanisation des activités du premier quart de siècle, qui vise l'augmentation de la

productivité, diminue légèrement le nombre total d'accidents, mais elle en modifie leur nature.

La période couvrant 1921-1951 a connu une expansion énorme en termes de main-d'œuvre dans l'industrie minérale québécoise. En utilisant la même base de 300 jours de travail par an, il y a moins de 4 800 travailleurs en 1921 alors qu'on en dénombre tout près de 25 000 en 1951. C'est dans les mines d'or et d'argent qu'on note la plus grande augmentation, soit d'une vingtaine de travailleurs en 1951 à près de 5 000 en 1951 (Vallières, 1989). Cette main-d'œuvre travaille toutefois dans des conditions habituellement laborieuses, sans réel pouvoir de négociation face aux entreprises qui les embauchent. C'est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit des villages et villes minières où les travailleurs sont dépendants de leur employeur. Ces derniers détiennent alors un contrôle décisif sur la main-d'œuvre, sauf en temps de guerre où cette main-d'œuvre devient moins rare.

Devant cette industrie qui embauche de plus en plus de travailleurs et où de plus en plus de travailleurs y décèdent ou développent une maladie professionnelle, l'État n'a eu d'autre choix que d'intervenir. Par diverses mesures législatives et règlements, les gouvernements s'attardent à ces problématiques en faisant surveiller par des inspecteurs les abus et les imprudences des compagnies. Parmi ces nouvelles mesures, mentionnons trois lois importantes de 1928. La première augmente les indemnités et oblige les employeurs à s'assurer pour les risques prévus dans la loi ou à mettre sur pied leurs propres assureurs (18 George V, chap. 79). La deuxième donne naissance à une Commission des accidents du travail (CAT) qui se voit être « la seule autorité compétente pour l'interprétation, l'administration, l'application et la mise à effet de la Loi des accidents de travail » et qui détient le pouvoir de surveiller la prévention des accidents (18 George V, chap. 80). La troisième loi (21 George V, chap. 100), cette fois en 1931, adopte le principe de responsabilité collective des employeurs, forçant ceux-ci à contribuer obligatoirement à un fonds d'accident. De plus, la CAT se voit octroyer plus de mordant pour ces enquêtes, obtient la responsabilité de verser les compensations à même le fonds et établit le montant des

cotisations. À partir de cette dernière, certaines maladies industrielles seront considérées comme des accidents de travail, conditionnellement cependant. Bref, ces nouvelles lois, s'ajoutant à la loi de 1909 « concernant les responsabilités des accidents dont les ouvriers sont victimes dans leur travail, et la réparation de dommages qui en résultent » (9 Édouard VII, chap. 66) qui responsabilise l'employeur face aux accidents de travail de ses employés, viendront bouleverser l'industrie minière. Dorénavant, la loi oblige les entreprises à faire rapport, ce qui permet au Service des mines d'établir les facteurs de risques de cette industrie. Dès lors, de nombreuses statistiques deviennent ainsi disponibles.

Nous avons un bilan des accidents de la période 1922-1950 au Tableau-A II-1 de la page suivante. Au cours des années 1920, les mines à ciel ouvert sont les plus nombreuses, ce qui explique le nombre d'accidents plus élevé chez ce type d'exploitation. Dans les années 1930, les mines souterraines deviennent plus populaires, d'où la hausse dans le nombre d'accidents comparativement aux autres exploitations. En période de croissance soutenue de l'industrie, 1925-1930 et 1932-1938, le nombre d'accidents a suivi la même tendance, suite à l'arrivée d'une nouvelle main-d'œuvre avec moins d'expérience et moins bien formée. Cette main-d'œuvre fût entre autres, embauchée lors de l'ouverture des mines d'or de l'Abitibi, particulièrement entre 1934-1938. En conséquence de l'augmentation du nombre d'accidents, il y a de la part de la Commission des accidents de travail, une hausse des cotisations pour la majorité de l'industrie minière. Finalement, de 1938 à 1948, le niveau des accidents demeure élevé et stable, pour légèrement diminuer jusqu'en 1950.

Tableau-A II-1 Accidents dans les mines du Québec, 1922-1950
 Adapté de Vallières (1989, p. 222)

Années	Mortels				Non mortels			
	souterrain	ciel ouvert	surface	Total	souterrain	ciel ouvert	surface	Total
1922	-	10	1	11	10	119	234	363
1923	2	3	-	5	25	116	37	178
1924	2	5	-	7	19	124	31	174
1925	3	5	2	10	20	125	15	160
1926	6	2	4	12	39	166	21	226
1927	6	6	6	18	47	222	34	303
1928	3	5	1	9	75	184	43	302
1929	3	4	3	10	53	189	52	294
1930	7	3	3	13	188	180	60	428
1931	3	1	0	4	190	128	55	373
1932	8	0	0	8	222	64	48	334
1933	6	0	2	8	169	22	44	235
1934	7	0	1	8	172	38	51	261
1935	10	0	1	11	257	94	64	415
1936	9	1	6	16	415	101	121	637
1937	10	6	2	18	898	158	332	1 388
1938	24	11	5	40	865	84	244	1 193
1939	9	4	1	14	803	98	218	1 119
1940	22	2	1	25	926	75	206	1 207
1941	29	0	0	29	1 026	74	238	1 338
1942	25	0	1	26	1 136	83	343	1 562
1943	14	4	1	19	1 084	86	327	1 497
1944	15	0	2	17	1 081	68	361	1 510
1945	16	1	4	21	917	67	424	1 408
1946	16	1	2	19	848	63	572	1 483
1947	31	1	4	36	832	58	326	1 216
1948	21	0	1	22	776	44	259	1 079
1949	21	2	0	23	668	41	175	884
1950	20	1	4	25	573	29	169	771

Pour pallier à la pénurie de main d'œuvre qui a sévit dans le contexte de l'après-guerre, l'industrie minière a salué l'arrivée de nombreux immigrants provenant des quatre coins du monde. C'est particulièrement le cas pour l'Abitibi-Témiscamingue où la concentration de

mines a considérablement augmentée dans la première moitié du XXe siècle. Ce sont les Polonais qui sont les plus nombreux à s'y être installés (Lambert-Racine et St-Pierre, 2010). Ces immigrants, des mineurs d'expérience, ont souvent servi de mentors pour les francophones sans expérience de ce domaine. Mais aussi, les immigrants ont milité pour l'amélioration des conditions de travail dans les mines, spécialement en participant à des grèves. D'ailleurs, ce n'est pas pour rien que l'une des grèves les plus célèbres et violentes fut celle des « Fros » (pour *foreigner*). Cette grève de 1934 à la mine Horne où la majorité des grévistes étaient d'origine étrangère a mené au congédiement de la moitié d'entre eux au cours des débrayages.

Selon Vallières (1989), les principales causes d'accidents de ce deuxième quart de siècle demeurent les chutes, éboulements et roulage des minerais transportés ainsi que les fausses manœuvres des opérations de forage et de dynamitage.

Toutefois, l'établissement de la CAT, l'obligation des entreprises à s'assurer et la cotisation par industrie poussent ces entreprises minières à tenter de diminuer ces coûts additionnels. C'est justement à partir de cette époque que les entreprises minières, particulièrement les plus grandes, semblent s'attarder plus intensivement à la sécurité et à la prévention des accidents. Moins elles sont performantes à ce niveau, plus leurs cotisations et assurances sont dispendieuses. La sécurité devient donc une question financière pour les entreprises minières et par le fait même, plus importante.

En même temps, d'autres règlementations viennent s'ajouter, telles que le port de casque, de bottes et de lunettes de sécurité. Ces équipements sécuritaires réduiront le nombre d'accidents, surtout chez les travailleurs inexpérimentés et peu ou pas formés, qui représentent une forte proportion des victimes.

Malgré des percées substantielles au niveau des accidents de travail, on tarde à s'intéresser aux maladies professionnelles. Par exemple, la silicose ne fera partie de la liste des maladies

industrielles de façon définitive qu'en 1938 (2 George VI, chap. 89). À cet égard, les mines du Nord-Ouest québécois présentent des proportions alarmantes de poussières silicieuses. À un tel point que l'on doit passer au forage humide, au port du masque et aussi à l'amélioration de la ventilation (Vallières, 1989). De son côté, l'amiantose s'inscrit sur la liste des maladies industrielles en 1943 (7 George VI, chap. 27). L'État reconnaît alors les effets néfastes à long terme du travail dans des lieux trop empoussiérés ou mal ventilés, mais les actions pour y remédier tardent à venir.

La période 1921-1950 est le théâtre de l'intervention de l'État dans le domaine des accidents de travail, de leur prévention et de leur compensation. De grandes améliorations ont ainsi vues le jour, même s'il reste encore un bout de chemin à faire, comme dans le cas des maladies professionnelles.

Prise de conscience

Entre 1950 et 1985, l'industrie minérale continue à créer son lot d'emplois, avec quelques moments forts et plus faibles. En utilisant la même base de 300 jours, le nombre de travailleurs varie entre 25 000 et 30 000 entre 1951 et 1981, et ce, même si la production augmente de manière significative (Vallières, 1989). Des sommets sont atteints en 1957 (28 734), 1966 (28 268) et 1974 (30 476). À partir de 1980, on dénombre une baisse importante qui s'accentue avec les années qui suivent. On parle de 27 290 travailleurs en 1980, 26 745 en 1981, 21 954 en 1982 et 20 300 en 1983. Vallières (1989) explique cette chute de la main-d'œuvre par un ensemble de causes: l'utilisation accrue de la mécanisation, la nécessité économique des exploitants à ciel ouvert, la concentration de la production détenue par un nombre limité de plus gros producteurs, la diminution de réserves et de teneurs de la majorité des gisements, les nouvelles découvertes qui se font de plus en plus rares et finalement, à la désuétude de nombreuses substances, en cours de remplacement par des produits synthétiques.

Au cours des années 1950, les inspecteurs portent une attention particulière à la qualité de l'air dans les mines. Le tout se réalise par la prise et l'analyse d'échantillons d'air et de la concentration des poussières en suspension. Les inspecteurs s'assurent également du respect de l'obligation qu'on les travailleurs exposés aux poussières de se soumettre à un examen annuel aux rayons X. À la mine Sigma à Val-d'Or, les travailleurs portent sur eux des allumettes de bois pour tester le niveau d'oxygène (Lessard, 2009). Si l'allumette s'éteint c'est qu'ils doivent remonter à la surface avant qu'il ne soit trop tard. Pour sa part, la problématique concernant l'intensité du bruit sur les lieux de travail et les moyens de protection pour le mitiguer fera l'objet d'efforts concrets au milieu des années 1970.

Aux efforts d'inspection de conformité des installations à des normes sécuritaires, s'ajoute une préoccupation de prévention et de sensibilisation aux accidents de travail, menée avec la Commission des accidents du travail et son remplaçant, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). À tout cela, vient se greffer au cours de la même période des programmes d'entraînement au sauvetage dans les mines.

Parallèlement, au cours des années 1960 et encore davantage dans les années 1970, l'industrie est confrontée à plusieurs grèves et lock-out qui totalisent des centaines de milliers de jour/homme perdus. Les syndicats qui deviennent de plus en plus respectés, ont bien entendu des revendications salariales, mais également des revendications au niveau de la santé au travail. Le secteur de l'amiante, qui est particulièrement préoccupé par cette question, fait l'objet d'une première étude effectuée en 1979 par le docteur Irving Selikoff de l'hôpital Mount Sinaï de New York¹⁷ (Selikoff *et al.*, 1979). Cette étude a été menée sur des travailleurs américains et canadiens du secteur de l'isolation, c'est-à-dire des travailleurs ayant procédé à des flocages ou des calorifugeages. Les résultats sont spectaculaires: sur les

¹⁷ Certaines maladies industrielles préoccupaient déjà les intervenants avant les années 1970 (comme la silicose, l'amiante et autres maladies provenant de la poussière), mais aucune étude fiable n'a eu lieu auparavant.

17 800 travailleurs étudiés de 1967 à 1976, 2 271 sont décédés, dont 21 % de cancers du poumon et 8 % de mésothéliomes. Tandis que 320 cancers étaient recensés, il y en a eu 995 en réalité, soit 675 cas de plus. Suite à cette étude qui met en évidence un excès des cancers des voies respiratoires et des voies digestives, de nombreuses autres études épidémiologiques viendront corroborer le lien entre amiante et cancer ainsi qu'entre amiante et mésothéliome. Parmi celles-ci, notons Nicholson (1979), Dement (1982, 1983), MacDonald (1980, 1983, 1984), Finkelstein (1983), Seidman (1979, 1984), Peto (1980, 1982, 1985) (citées par Le Déault et Revol, 1997, p. 18) ainsi que l'étude de Dufresne *et al.* (1993).

Ces résultats percutants viennent accentuer la solidarité des travailleurs et alarment les entreprises minières dont les installations désuètes nécessiteraient des investissements énormes afin de respecter une éventuelle augmentation des normes de salubrité dans les lieux de travail.

Il y a une prise de conscience de plus en plus intense du danger du travail dans les mines depuis les années 1950-1960. Cependant, le point culminant se situe dans les années 1970-1980, alors que les risques de ce domaine deviennent une préoccupation prépondérante tant pour les compagnies (spécialement par leur associations) que pour les syndicats, ayant comme partenaires publics les services d'inspection du ministère des Mines (Richesses naturelles et Énergie et Ressources) et la Commission des accidents du travail qui est devenue la Commission de la santé et de la sécurité du Travail (Vallières, 1989).

Entre 1950 et 1980, l'industrie minière, à l'instar du milieu de la construction, est l'un des domaines de production où il y a le plus de dangers. Les conditions de travail créent plusieurs situations enclines aux accidents de toute nature (ex.: chutes d'objets, de roches et de personnes, explosifs, échafaudages, chargement et manutention de la roche). Les accidents de cette période prennent leurs origines depuis plusieurs facteurs: déficiences de procédés de production, non-respect des règles de sécurité par des producteurs recherchant la rapidité et les économies, pression abusive sur les travailleurs par chantage de congédiement ou par des

mesures d'incitation ou de primes au rendement attachées à la productivité individuelle, négligence ou relâchement de l'attention des travailleurs, finalement d'un amalgame de ces facteurs ou encore du hasard.

Au Tableau-A II-2 de la page suivante, nous avons les données sur le nombre d'accidents de la période couvrant 1950 à 1975. Les informations disponibles à partir de cette époque sont de plus en plus précises et utiles. En plus d'offrir le nombre d'accidents, nous avons de l'information sur le taux d'accidents par million d'hommes-heures, ce qui offre une meilleure base de comparaison entre les heures travaillées et le nombre d'accidents. Nous pouvons remarquer une baisse dans le taux d'accidents par million d'hommes-heures de 1950 jusqu'au milieu des années 1950. Comme l'indique Vallières (1989), les interprétations des causes de baisses ou de hausses dans les taux sont assez risquées. Par exemple, lors des hausses de 1964 à 1967 ainsi que de 1970 à 1974, nous ne pouvons pas simplement relier ces fortes augmentations à des relâchements ou encore à une main-d'œuvre plus jeune et moins bien formée. Une part des augmentations est attribuable à une croissance des demandes d'indemnisation pour des accidents légers avec arrêts de travail très brefs ou sans arrêt de travail. De plus, la définition d'un accident de travail tend à s'élargir à un vaste inventaire de malaises musculaires ou dorsaux, ce qui a pour effet d'ébranler les statistiques, mais aussi de porter un coup dur aux coûts des employeurs qui financent par le biais de leurs cotisations les prestations versées aux accidents. Face à cette situation où il devient alors difficile d'évaluer leur performance en santé et en sécurité, les entreprises se sentent impuissantes dans leurs objectifs visant à diminuer le nombre d'accidents.

La situation a continué à fluctuer au cours des années suivantes. D'après les relevés de l'Association des mines de métaux du Québec, le taux passe à 27,4 en 1977, 16,8 en 1978 et à 52,9 en 1981 (Vallières, 1989).

Tableau-A II-2 Accidents dans les mines du Québec, 1950-1975
 Adapté de Vallières (1989, p. 386)

Années	Mortels	Non mortels	Taux par M hommes/hrs
1950	25	926	22,1
1951	25	960	21,5
1952	21	826	17,5
1953	16	719	16,7
1954	29	572	13,5
1955	27	721	15,7
1956	21	858	17,0
1957	24	770	15,5
1958	14	586	12,0
1959	18	651	14,2
1960	17	659	14,2
1961	13	621	13,8
1962	18	610	13,4
1963	9	649	13,9
1964	17	778	16,6
1965	7	946	20,2
1966	20	902	19,1
1967	13	975	20,1
1968	12	605	11,9
1969	12	719	14,5
1970	14	895	17,9
1971	12	875	18,3
1972	10	780	20,0
1973	11	940	23,3
1974	19	1 121	24,5
1975	10	938	23,4

Entre 1975 et 1980, deux évènements distincts auront des répercussions importantes qui modifieront la perception et le concept de santé et sécurité du travail. Le premier, est le produit de la longue grève de l'amiante de 1975. Ce produit est le Comité Beaudry (présidé par René Beaudry) formé le 18 juin 1975 pour étudier la salubrité dans l'industrie de l'amiante. Ce Comité Beaudry vise à apporter un regard objectif entre les syndicats et les entreprises de Thetford Mines qui s'affrontent en avançant les résultats (respectivement en

leur faveur) d'études scientifiques que chacune des parties ont commandées. Le deuxième évènement est l'effondrement dans la mine de Ferderber (appelée communément Belmoral) près de Val-d'Or qui a fait 8 morts le 20 mai 1980. En plus de provoquer une onde de choc dans la communauté québécoise entière, cet accident mortel pousse le gouvernement du Québec à instituer le 9 juillet 1980 une commission d'enquête, présidée par le juge René Beaudry (Guay, S.D.). Cette commission reçoit le mandat de déterminer les causes et les circonstances de l'accident, les conditions qui l'ont provoqué, mais également les mesures de prévention et les règles de sécurité à instaurer pour en éviter la répétition ainsi que la valeur des moyens de sauvetage déployés et les méthodes de les améliorer.

Le Comité et la Commission Beaudry apportent des recommandations qui changeront l'industrie de façon décisive. Par exemple, le Comité précise la nécessité d'un changement de philosophie sociale qui modifie le concept fataliste et négatif « du danger inhérent au travail » en une doctrine positive « d'intégrité physique au travail » (Beaudry, 1976). Ce qui veut dire que l'employé ne doit plus se rendre au travail et en revenir avec la conception que son métier l'expose inévitablement à la maladie ou à l'insécurité physique; à l'inverse, il doit pouvoir remplir sa profession avec la certitude que sa santé lui est assurée. C'est tout un changement de mentalité et de perception qui doit alors être fait. La Commission de son côté, émet plusieurs recommandations dont l'une mènera au plan Catamine qui se veut un plan d'entraide entre les mines pour être en mesure d'intervenir lors d'une catastrophe minière (Whittom, 2009). Les évènements de Belmoral ont laissé une image de désorganisation en matière de plan d'urgence lors d'accidents.

S'en suit une recommandation qui veut faire de la santé au travail un droit inaliénable, dont la responsabilité est partagée entre l'État, l'employeur et l'employé. L'État est donc invité à créer une régie de la santé au travail qui sera chargée de coordonner les programmes de surveillance de la salubrité du milieu et de la santé au travail et de modifier la législation et la réglementation appropriée. Parallèlement, les médecins et professionnels (ingénieurs et techniciens) se voient octroyer la responsabilité de développer des méthodes, des moyens et

des technologies servant à atteindre cet objectif. L'application de ces recommandations nécessite une remise en question de l'ensemble du système et force une réforme qui prendra forme quelques années plus tard avec la transformation de la Commission des accidents de travail en la Commission de la santé et de la sécurité du travail jumelée à une refonte complète de la législation et règlementation pertinente (Vallières, 1989).

Nous pouvons tirer quelques conclusions intéressantes de cette annexe portant sur la performance en SST dans l'industrie minière québécoise. Dans un premier temps, il a été permis de constater que la mécanisation des activités, visant l'augmentation de la productivité, avait également comme effet de modifier la nature des accidents chez les travailleurs. Ensuite, cet historique a mis de l'avant le rôle prépondérant de l'État, entre autres, avec l'établissement de la CAT, dans l'amélioration des conditions de travail de ce secteur. Toutefois, il aura fallu attendre que des accidents malheureux se produisent avant qu'un changement de philosophie et des actions concrètes voient le jour dans ce secteur d'activité.

ANNEXE III

CAUSES DU DÉCÈS À LA MINE LARONDE DU 2 MARS 2011

Agnico-Eagle blâmée pour la mort d'un travailleur

Plusieurs facteurs auraient contribué au drame

■ PATRICK RODRIGUE
PATRICK.RODRIGUE@TRANSCONTINENTAL.CA

Une série de facteurs pourrait expliquer le décès d'un tuyau survenu le 2 mars dernier à la mine LaRonde d'Agnico-Eagle à Cadillac.

Dans un rapport présenté aux médias le 8 août, la CSST a fait valoir qu'elle considérait que la compagnie minière avait agi de manière à compromettre la sécurité des travailleurs. Elle s'est donc vu imposer un constat d'infraction, dont l'amende pourrait aller jusqu'à 60 000 \$.

«Agnico-Eagle division LaRonde n'a cependant pas encore été déclarée coupable et possède encore un délai pour contester cette décision», a précisé Annick Lavoie, directrice santé et sécurité à la CSST de l'Abitibi-Témiscamingue.

ÉCRASÉ PAR LA CHARGEUSE-NIVELEUSE

Le 2 mars dernier, le tuyau Jean-Yves Dunn, à l'emploi de SEMI 2000, est mort après avoir été écrasé par une chargeuse-niveleuse (communément appelée un scoop). Il effectuait alors des travaux d'installation d'un système de climatisation au niveau 278.

«Au cours de l'avant-midi, M. Dunn constate que de l'eau s'accumule près de la salle et qu'elle y entre lors de chaque passage d'un véhicule. En début d'après-midi, il entendait creuser une rigole pour favoriser l'écoulement de l'eau. Vers 13h30, un travailleur qui s'affairait à déblayer une rampe tourne à droite avec sa chargeuse-niveleuse et se dirige vers l'endroit où travaille M. Dunn. Comme le godet est rempli de roche, il voit mal devant lui. Ce n'est qu'après avoir

remarqué un casque de sécurité sur le sol qu'il s'arrête. Il aperçoit alors le corps de M. Dunn partiellement sous la roue avant gauche du véhicule. Ce dernier est transporté au Centre hospitalier d'Amos, où son décès est constaté», a raconté l'inspecteur François Trudel.

LUMIÈRE, ANGLES MORTS ET SIGNALISATION

À la lumière de son enquête, la CSST a constaté que plusieurs facteurs étaient entrés en jeu dans ce drame. D'abord, les angles morts de la chargeuse-niveleuse et du mur d'intersection avaient empêché l'opérateur de voir le travailleur dans la galerie. «Et comme M. Dunn était penché pour creuser la rigole, il était déjà moins visible en partant», a mentionné M. Trudel.

L'éclairage d'appoint de 250 watts installé dans la salle de climatisation aurait quant à lui atténue le faisceau des phares du véhicule, empêchant le travailleur de l'apercevoir. De même, l'absence de signalisation appropriée aurait empêché l'opérateur de connaître la présence de Jean-Yves Dunn dans la galerie.

KLAXON TROP FAIBLE

Le bruit ambiant aurait aussi joué un rôle. L'endroit où Jean-Yves Dunn travaillait était en effet situé à une douzaine de mètres de trois énormes ventilateurs. Les tests réalisés par la CSST ont démontré que leur bruit était de 96,5 décibels. Celui du klaxon totalisait pour sa part 89 décibels.

«Même lorsque le moteur du véhicule tourne, c'était insuffisant», a commenté François Trudel. Lors de notre reconstitution de l'accident, nous avons eu de la misère à l'entendre, alors que nous étions attentifs. Il est à peu près certain qu'un travailleur concentré

sur sa tâche ne l'aurait pas entendu. De plus, notre enquête a démontré que l'opérateur n'avait pas actionné le klaxon avant de tourner et qu'il ne s'agit pas non plus d'une pratique bien établie dans cette mine.»

L'inspecteur François Trudel montre un schéma de l'endroit où s'est produit l'accident. (Photo: Patrick Rodrigue)

■ PATRICK RODRIGUE
PATRICK.RODRIGUE@TRANSCONTINENTAL.CA

Les conclusions du rapport de la CSST relativement au décès de Jean-Yves Dunn à la mine LaRonde ont incité Agnico-Eagle à développer des technologies novatrices, notamment un détecteur de travailleurs.

À la lumière de son enquête, la CSST a notamment exigé de la société minière qu'elle révise sa procédure concernant la visibilité du personnel sous terre, en particulier en ce qui a trait aux travaux de courte durée. Elle a aussi exigé que la mine vérifie la possibilité de réduire au maximum les angles morts sur les véhicules. Enfin, elle a exigé des correctifs quant à l'intensité du klaxon des chargeuses-niveleuses et son utilisation à l'approche des intersections.

PLUSIEURS SOLUTIONS À L'ÉTUDE

L'enquête réalisée à l'interne par Agnico-Eagle a identifié des mesures correctives similaires à celles présentées par la CSST.

«J'aimerais exprimer de nouveau, au nom d'Agnico-Eagle, mes plus sincères condoléances à la famille, aux amis et aux collègues de M. Dunn, a déclaré le PDC de la compagnie, Eberhard Scherkus, par voie de communiqué. Nous allons nous assurer que toutes les mesures soient mises en place afin que ce genre d'accident ne se reproduise plus», a ajouté M. Scherkus.

Parmi les initiatives entreprises par Agnico-Eagle, on retrouve des essais déjà en cours pour munir les véhicules miniers souterrains d'appareils pouvant détecter la présence de travailleurs à proximité. «Nous coopérons aussi avec les manufacturiers d'équipements miniers afin d'améliorer le champ de vision des conducteurs», a fait savoir M. Scherkus.

Le prix des métaux une présentation de

BERSHIMCO Resources

Rodrigue, P. 2011. «Agnico-Eagle blâmée pour la mort d'un travailleur: Plusieurs facteurs auraient contribué au drame». Abitibi Express, Mardi 16 août 2011, p. 6.

ANNEXE IV

LITTÉRATURE SUR L'INNOVATION

Cette partie expose une brève revue de littérature portant sur des concepts importants de l'innovation. Dans un premier temps, nous aborderons le thème du cycle de vie des technologies, ensuite il y aura une définition générale de l'innovation. Par la suite, nous évoquerons la notion d'impact dans le concept de l'innovation et finalement, nous discuterons des différents degrés d'innovation.

Cycle de vie des technologies

Joseph Aloïs Schumpeter (1911 et traduit en anglais en 1934) est l'un des premiers à avoir documenté l'innovation. Tidd *et al.* (2006) le qualifie comme étant le parrain des études sur l'innovation. Schumpeter définit l'innovation comme l'exécution de nouvelles combinaisons de moyens de production. Il prétend que le développement économique est causé par l'innovation, par le biais d'une transformation dynamique dans lequel de nouvelles technologies remplacent les vieilles. Ce processus est qualifié de « destruction créatrice » par Schumpeter. C'est en quelque sorte le principe fondamental derrière la courbe en S qui sera popularisée par Christensen (1992). Cette courbe que l'on retrouve dans la Figure-A IV-1 de la page suivante, représente la substitution d'une technologie par une nouvelle. Sur l'axe des ordonnées nous retrouvons l'amélioration de la performance de la technologie pour les utilisateurs, alors que sur l'axe des abscisses il y a le temps, auquel nous pourrions ajouter les efforts en R&D. Par exemple, prenons le cas de l'utilisation des chevaux sous terre pour transporter le minerai (qui représente la vieille technologie). Ce moyen de transport fut éventuellement dépassé par l'introduction des véhicules motorisés. Mais comme la majorité des nouvelles technologies, avant que celle-ci augmente la productivité des utilisateurs il y a une certaine période d'adaptation. Période qui une fois terminée, permet une hausse significative de la productivité et qui, par le fait même provoque la désuétude (maturité) de l'ancienne technologie.

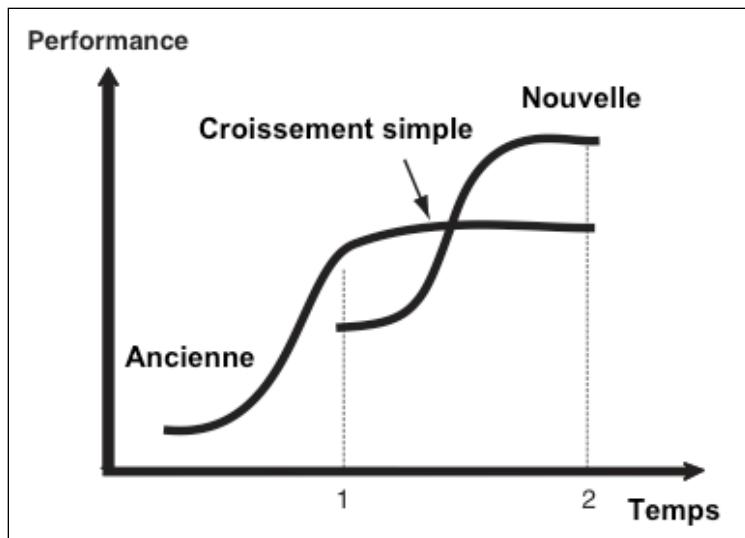


Figure-A IV-1 Courbe en S de la technologie
Adaptée de Sood et Tellis (2005, p. 153)

Définition de l'innovation

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 1, l'une des références utilisées par plusieurs chercheurs dans le domaine de l'innovation celle du Manuel d'Oslo, publié par l'OCDE. De ce fait, le Manuel d'Oslo (2005) définit l'innovation comme suit:

L'innovation est la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures. (OCDE, 2005, p. 54)

Cette définition très évasive, valide toutefois l'affirmation de Loilier et Tellier (1999) selon laquelle l'innovation est un concept à la fois polysémique et polymorphe.

Impact de l'innovation

L'impact de l'innovation est une notion importante dans le concept de l'innovation. L'un des termes le plus fréquemment utilisé est celui de l'innovation radicale ou provoquant une

rupture. Celui-ci se définit comme une innovation dont l'impact est significatif sur un marché ainsi que sur l'activité économique des entreprises de ce marché. Cette conception s'attarde donc à l'impact des innovations au lieu de leur nouveauté. Christensen (1997) précise qu'un tel impact peut modifier la structure du marché, créer de nouveaux marchés ou encore provoquer la désuétude de produits existants tel qu'expliqué dans la courbe en S (voir Figure-A IV-1). Un autre exemple d'innovation de rupture est celui de l'introduction des foreuses à air qui a déclenché la désuétude complète du pic et du marteau au tournant du 20e siècle et ainsi provoqué une révolution dans le milieu de l'extraction du minerai. Comme dans le cas de cet exemple, l'innovation radicale est souvent poussée par une nouvelle technologie, ce qui s'accompagne aussi d'un changement d'acteurs dominants ou de l'arrivée de nouveaux acteurs (Le Loarne et Blanco, 2009).

Cependant, l'innovation n'engage pas toujours de profonds chambardements (Meier et Schier, 2007), elle n'est pas toujours « destruction créatrice » comme la qualifiait Schumpeter (1934). Par opposition au concept d'innovation de rupture (ou radicale) il y a l'innovation incrémentale (ou progressive). Celle-ci vise plutôt de petits changements ou petites améliorations sur une base quotidienne (Tidd *et al.*, 2006). L'innovation incrémentale se situe donc dans une perspective d'amélioration progressive des performances sans toutefois exiger des savoir-faire nouveaux. Elle représente une suite d'actes d'apprentissage et d'adresse sur une technologie donnée. Ce type d'innovation est fréquent pour la simple raison que malgré son impact technique généralement modeste, elle est en revanche très intéressante au plan financier puisque les risques encourus demeurent à un niveau « acceptable » (Loilier et Tellier, 1999).

Selon Broustail et Frery (1993), il faut cependant faire attention et nuancer cette opposition entre ces deux types d'innovation, notamment sur le plan du domaine de référence et de leur globalité. L'évaluation du degré de radicalité de l'innovation dépend de la perspective temporelle choisie et de la position de l'acteur sur la chaîne de l'innovation industrielle (tel que précisé initialement avec la chaîne d'innovation). Des innovations, apparaissant à

première vue comme mineures, peuvent devenir des innovations majeures au terme d'un processus de diffusion. Similairement, des innovations incrémentales dans un domaine donné peuvent se transformer en valeur radicale dans un domaine différent. C'est le cas des progrès incrémentaux des matériaux qui ont permis plusieurs innovations radicales dans des domaines divergents (Loilier et Tellier, 1999).

Comme nous venons d'en discuter, la notion d'impact de l'innovation est intimement liée à l'intensité de cette innovation. Et selon Loilier et Tellier (1999), c'est l'intensité du changement introduit qui définit le degré d'innovation.

Degrés d'innovation

L'étude empirique de Garcia et Cantalone (2002) met en lumière l'absence de consensus dans les définitions des degrés d'innovation. Cette étude révèle que sur seulement 21 études empiriques dans la littérature sur la modélisation de l'innovation de nouveaux produits, pas moins de 15 construits et au moins 51 échelles différentes ont été utilisées. Cette abondance de classification a mené à l'utilisation de mêmes termes pour identifier différents degrés d'innovation, alors que les mêmes degrés d'innovations ont été identifiés avec des termes différents (Garcia et Cantalone, 2002). Cette révélation n'est pas étonnante, car comme nous en avons déjà discuté, la nature de l'innovation ainsi que la perception qu'en ont les auteurs/utilisateurs sont bien différentes selon où ils se situent sur la chaîne de l'innovation. La matrice de Tidd *et al.*, (2006) présentée dans la Figure-A IV-2 de la page suivante et à partir de laquelle des exemples du domaine de l'extraction minière ont été ajoutés démontre bien cette affirmation. Il doit y avoir une distinction entre les innovations en termes des composants et celles au niveau du système, car ce sont les améliorations au niveau des composants qui provoquent généralement des innovations au niveau du système. Les degrés de nouveauté qui vont des petites améliorations incrémentales à des changements radicaux modifient la façon dont nous devons penser et employer l'innovation. Il arrive que ces changements soient communs à un secteur particulier ou une activité; il n'est pas rare qu'ils

soient tellement radicaux et d'une portée si étendue qu'ils changent la base de l'entreprise (Tidd *et al.*, 2006). C'est précisément ce qui s'est produit avec l'avènement de la machine à vapeur dans le milieu industriel, dont l'industrie minière. Alors que des changements moins révolutionnaires, par exemple au niveau de l'ergonomie de la machinerie représentent des changements incrémentaux. Les changements peuvent donc se produire sous forme de composant, de sous-système ou encore à travers l'ensemble du système.

NIVEAU SYSTÈME ↑ NIVEAU COMPOSANT	Nouveaux modèles de camions	Nouveautés générales. Par ex. foreuses robotisées vs foreuses manuelles	Machine vapeur, force hydraulique
INCRÉMENTAL ("Faire ce que l'on fait en mieux")	Améliorations composants	Nouveau composant pour système existant	Matériaux de pointe afin d'améliorer la performance des composants
		(Nouveau pour l'entreprise)	RADICAL (Nouveau pour le monde)

Figure-A IV-2 Paramètres de l'innovation
Adaptée de Tidd *et al.* (2006, p. 12)

Cette classification ressemble à celle introduite par Booz *et al.* (1982). Ces auteurs proposent une classification établie à partir de deux critères : le degré de nouveauté pour l'entreprise (qui correspond aux lignes de leur matrice) et le degré de nouveauté pour le marché (qui correspond aux colonnes). Le degré d'intensité de nouveauté s'accentue lorsque l'on se déplace en diagonale sur cette matrice, en allant du bas à gauche vers le haut à droite. Cette matrice prend donc la forme du Tableau-A IV-1 de la page suivante. Nous pouvons remarquer de fortes ressemblances avec entre cette dernière classification et celle utilisée par l'OCDE présentée au Tableau 1.5 de la page 32.

Tableau-A IV-1 Matrice d'intensité de nouveauté
Tiré de Booz *et al.* (1982, p. 9)

Nouveauté pour le marché Nouveauté pour l'entreprise	Basse	Moyenne	Haute
Haute	Nouveau pour la société		Nouveau dans le monde
Moyenne	Amélioration de produit	Gamme de produits existante étendue	
Basse	Réduction des coûts	Repositionnement	

La matrice de Booz *et al.* (1982) différencie trois niveaux d'intensité de nouveauté pour l'entreprise ainsi que pour le marché. Mais comme nous en avons discuté, dépendamment de l'acteur et de la nature de l'innovation, l'intensité de nouveauté est perçue différemment. Par exemple, une innovation technologique majeure dans une composante peut être transparente pour l'utilisateur, c'est-à-dire sans réels effets sur sa façon de travailler.

De même, la perception des spectateurs/utilisateurs peut être différente selon les organisations (Garcia et Cantalone, 2002). Ces distinctions sont primordiales en ce qui concerne le processus de gestion de l'innovation (Tidd *et al.*, 2006). Par exemple, lorsque l'ère des systèmes informatiques en réseau est apparue, il fût plus facile pour une entreprise comme IBM que pour n'importe quelle grande entreprise minière de suivre cette tendance. Nous pouvons donc faire un lien entre le succès de l'implantation de l'innovation et le champ de compétence de l'organisation qui réalise cette implantation (Prahalad et Hamel, 1990).

ANNEXE V

ANALYSE MULTIATTRIBUT

Cette section propose une mise en contexte, version abrégée, de l'analyse multiattribut. Nous y dresserons initialement les postulats de cette approche d'aide à la décision. Par la suite, nous y présenterons les étapes essentielles avant de discuter des différentes possibilités de cette analyse, en mettant l'accent sur les différentes écoles de pensées et leur paradigme respectif. Finalement, nous terminerons avec un bref glossaire portant sur les principaux termes utilisés en analyse multiattribut.

Postulats d'une analyse multiattribut d'aide à la décision

Le choix de l'analyse multiattribut repose sur le fait que notre problématique s'intéresse à plusieurs conséquences. En effet, le succès d'une introduction d'innovation en équipement minier peut être influencé par plusieurs facteurs et peut avoir des conséquences à plusieurs égards (performance en productivité et en SST). En fait, un système de décision cadrant dans le paradigme multiattribut possède les caractéristiques suivantes (Zaras, 1996) :

- plusieurs attributs sont à l'oeuvre pour conduire le système ou guider son évolution;
- ces attributs sont conflictuels, c'est-à-dire qu'aller dans le sens du mieux pour un attribut conduit obligatoirement à aller dans le sens du moins bien pour un autre attribut;
- ces attributs tendent à s'ouvrir sur des compromis ou invitent à procéder à un arbitrage. Il n'y a plus d'optimum à découvrir ou à atteindre, mais seulement des compromis possibles, des arbitrages à intervenir.

Étapes d'une analyse multiattribut d'aide à la décision

La démarche d'une analyse multiattribut d'aide à la décision suit les étapes suivantes :

- dresser un inventaire de l'ensemble des actions potentielles (solutions possibles ou envisageables);
- dresser la liste des attributs à prendre en considération;
- évaluer la performance de chacune des solutions par rapport à chacun des attributs;
- agréger ces performances pour désigner la solution qui jouit globalement des meilleures évaluations.

La succession de ces étapes ne doit toutefois pas être considérée comme rigide et linéaire. La mise en oeuvre de cette démarche dans des situations concrètes est habituellement l'objet de retours en arrière, de remises en questions, de rétroactions d'une étape à l'autre, voire d'omissions corrigées plus tard (Martel et Bergeron, 1989). On retrouve également ces mêmes quatre étapes dans la Figure-A V-1 ci-dessous où Vansnick (2009) utilise plutôt le terme « critère » au lieu d' « attribut ».

Dans l'étape de l'inventaire des actions potentielles, l'action désigne, d'une façon générale, ce qui apparaît comme une éventuelle contribution à une décision et qui peut être repéré sous forme d'une liste des actions (a_1, a_2, \dots, a_m). L'ensemble de ces actions potentielles est désigné par la lettre A . En pratique, l'action représente ce à quoi la décision s'applique ou encore, ce à quoi elle se concrétise. Selon le cas, elle porte le nom d'un plan ou d'un programme (production, approvisionnement, entretien, etc.), d'un projet (tracé de lignes, produits nouveaux, etc.), etc. Cette première étape doit également être l'occasion d'une réflexion sur le problème posé. C'est à ce moment que l'on doit cerner l'objet de décision et déterminer l'esprit dans lequel on s'attend à ce que la prescription soit présentée (Martel et Bergeron, 1989).

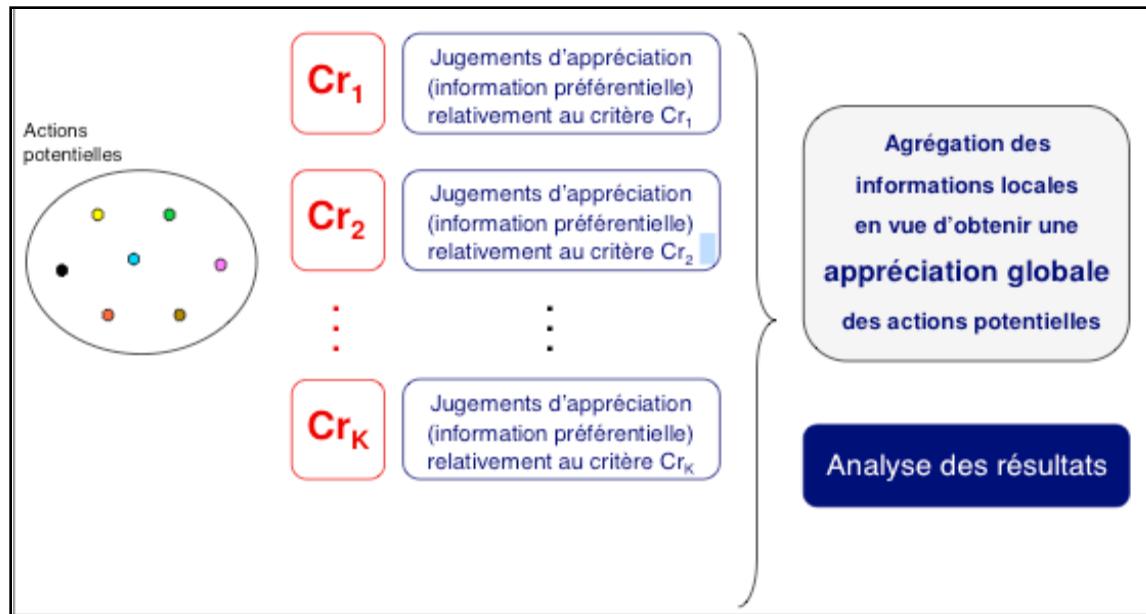


Figure-A V-1 Étapes du processus de décision multiattribut
Tirée de Vansnick (2009, p. 12)

L'étape de l'identification des attributs est celle qui s'intéresse aux conséquences qu'entraîne la mise à exécution de chacune des actions A . Selon Vansnick (2009), cette étape peut prendre jusqu'à 70% du temps consacré pour tout le processus. Prenons l'exemple du choix d'équipement de transport du minerai dans une mine souterraine afin de donner une idée plus précise de la « multiplicité » des conséquences qui peuvent être prises en considération. Voici quelques dimensions pertinentes pour cet exemple:

- coût d'investissement (en millions de dollars);
- coût annuel d'entretien (en millions de dollars);
- accroissement de la productivité (en tonnes/jour);
- amélioration des conditions de travail des opérateurs;
- formation nécessaire aux opérateurs et mécaniciens.

Strictement, construire un critère à partir d'une dimension j suppose que l'on se dote d'un moyen permettant d'associer (de façon certaine ou probabiliste), à chaque action potentielle a

de A , un échelon $g_j(a)$ d'une échelle. L'ensemble des critères ainsi construit (g_1, g_2, \dots, g_n), que l'on appelle parfois famille des critères, doit satisfaire aux conditions suivantes :

- d'exhaustivité (elle doit faire le tour de la question);
- de cohésion (une action quelconque a est d'autant meilleure selon un critère quelconque g_i que le nombre $g_i(a)$, qui est sa performance selon g_i , est plus grand);
- de non-redondance (pas de critères superflus).

Le critère, et à fortiori, la famille des critères, représentent ainsi un instrument d'évaluation et de comparaison qui a comme objectif de fournir aux acteurs participants au processus de décision, des paramètres d'appréciation susceptibles de promouvoir concertation et délibération (Boudreau-Trudel, 2010).

L'étape de l'évaluation de la performance de chacune des solutions est donc réalisable en associant à chacune des actions potentielles a un vecteur de performance

$$g(a) = (g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)) \quad (\text{A V-1})$$

Si l'ensemble A est fini, comme c'est généralement le cas dans une étude d'aide à la décision, il est possible de construire le tableau de performances pour l'ensemble des actions potentielles, tel que l'exemple du Tableau-A V-1. Dans ce type de tableau, à chaque attribut est associée une colonne, à chaque action potentielle correspond une ligne et à l'intersection d'une ligne et d'une colonne figure la performance de l'action en regard de l'attribut correspondant.

L'étape ultime repose sur ce tableau synthétisant les performances des actions potentielles sur les divers attributs. Le problème consiste à savoir sur la base de quels raisonnements on peut affirmer que « l'action a est au moins aussi bonne que l'action b », en tenant compte de tous

les attributs figurant dans le tableau. Pour répondre à ce type de question, il existe différentes approches proposées selon les écoles de pensée en aide à la décision multiattribut.

Tableau-A V-1 Tableau de performances

	attributs			
actions	g_1	g_2	g_j	g_n
a_1			:	
a_2			:	
a_i	$g_j(a_i)$	...
a_m			:	

Les écoles de pensée en aide à la décision multiattribut

Il existe deux principales écoles de pensées en aide à la décision multiattribut: l'École Américaine et l'École Européenne. Les techniques mises au point, de même que les actions qui doivent être entreprises dans le processus d'aide à la décision diffèrent d'une école à l'autre. Dans les deux cas, les travaux de recherche ont vu le jour dans les années 1960-1970 par des chercheurs désirant rendre la recherche opérationnelle plus proche de la réalité.

L'École Américaine

Du côté de l'École Américaine, il y a dans un premier temps, les travaux de Kenney et Raiffa (1976) portant sur la théorie d'utilité dans un contexte multiattribut. Ces travaux sont connus aujourd'hui sous le nom de *Multiattribute Utility Theory* (MAUT). À partir de la liste d'attributs pour chaque alternative, ce concept mesure l'utilité de la solution de chacune des alternatives par la construction d'une fonction mathématique qui considère tous les attributs impliqués dans le problème. On bâtit donc un critère unique de synthèse en utilisant une fonction d'agrégation U :

$$U(a) = U(g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)) \quad (\text{A V-2})$$

qui cherche à mesurer l'utilité totale que le décideur peut obtenir de chacune des actions potentielles. Cette fonction d'agrégation U prend souvent l'une des deux formes suivantes: agrégation multiplicative ou agrégation additive (Zaras, 1996). Dans le deuxième cas, la vérification des conditions d'indépendance mutuelle au sens des préférences et d'indépendance mutuelle au sens d'utilité doit être effectuée. Finalement, notons que le modèle d'utilité multiattribut conduit soit à la préférence stricte (entre deux actions potentielles), soit à l'indifférence. Il n'y a donc pas de place pour l'incomparabilité dans les préférences globales du décideur.

Toujours du côté de l'École Américaine, notons également les travaux de Thomas L. Saaty (1980), qui sont basés sur l'analyse hiérarchique des données, que l'on nomme AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Cette méthode basée sur la représentation hiérarchique des objectifs et des critères impliqués dans la résolution d'un problème, cherche une mesure globale pour chacune des alternatives potentielles. Des poids sont accordés aux différents critères en procédant par comparaisons par paires entre chaque élément d'un niveau hiérarchique ayant le même parent. Dans la construction de cette hiérarchie, les alternatives sont au niveau hiérarchique le plus bas et les actions potentielles sont soit comparées par paires, ou soit évaluées individuellement selon une échelle de performance propre à chaque critère (Boudreau-Trudel, 2010). L'agrégation des résultats de chaque action potentielle se fait pour l'ensemble des critères du modèle en tenant compte de leur poids respectif. Ainsi, ce modèle permet de donner la priorité ou encore de classifier les actions potentielles.

Notons que ces deux méthodes provenant de l'École Américaine (MAUT et AHP) fonctionnent avec des présuppositions comme la non-existence d'incomparabilité parmi les actions potentielles et la transitivité dans les relations de préférence et d'indifférence (Keeney et Raiffa, 1999).

L'École Européenne

L'agrégation totale en un critère unique, telle que privilégiée par l'École Américaine, exclut l'incomparabilité et repose sur un postulat de complète comparabilité transitive, c'est-à-dire que pour toute paire d'actions $a, b \in A$, on a:

$a \text{ P } b, b \text{ P } a \text{ ou } a \text{ I } b$, c'est à dire a préféré à b , b préféré à a ou a indifférent à b ;

de plus, ces relations de préférence sont transitives.

Par contre, dans un monde réel, il se peut très bien qu'une simple différence $U(a) - U(b)$ ne soit pas significative d'une préférence stricte. On peut attribuer à chaque évaluation de performance $g_j(a)$ deux seuils:

- un seuil d'indifférence;
- un seuil de préférence stricte.

Ces seuils ont une importance capitale pour la famille de méthodes ELECTRE (Élimination et choix traduisant la réalité). Prenons un exemple simple pour illustrer le rôle de ces seuils: l'achat d'équipement minier pour le transport du minerai sur l'attribut « coût d'investissement ». En fixant le seuil d'indifférence à 80 000 \$ et le seuil de préférence à 300 000 \$ on sera indifférent entre deux véhicules dont l'écart de prix est inférieur à 80 000 \$ et on préférera strictement un véhicule au prix le plus bas si l'écart de prix est supérieur à 300 000 \$. Si l'écart de prix est entre 80 000 \$ et 300 000 \$, on a une préférence faible pour celui qui affiche le plus bas prix.

Cette prudence dans la modélisation des préférences est à l'origine de l'approche de surclassement de synthèse qui nous vient de Bernard Roy (1968), qui est considéré comme le père de l'École Européenne.

Une relation de surclassement est une relation binaire S définie sur l'ensemble A , telle que pour toute paire d'actions $a, b \in A$, on décide en faveur d'une situation :

- d'indifférence, $a S b$ et $b S a$;
- de préférence stricte, $a S b$ et non $b S a$;
- d'incomparabilité, non $a S b$ et non $b S a$.

Cette relation S est habituellement construite dans cette méthode à l'aide d'un test de surclassement réalisé à toutes les paires d'actions de A . À partir de ce concept central de relation de surclassement, plusieurs méthodes ont vu le jour. Parmi celles-ci, soulignons la famille ELECTRE, qui va d'ELECTRE I à ELECTRE IV et qui est le fruit des travaux de Bernard Roy et de ses collaborateurs chercheurs au fil du temps. Une autre approche de l'École Européenne basé sur le surclassement est la famille PROMETHEE (*Preference ranking organization methods for enrichment of evaluations*) qui vient originellement de Jean-Pierre Brans (1982) et qui a connu des évolutions avec l'apport conjoint de Bertrand Mareschal. PROMETHEE se distingue d'ELECTRE par le fait qu'elle établit une relation de surclassement par une intensité de préférence et par son concept de flux net de surclassement (Brans et Mareschal, 2002).

Cette section portant sur l'analyse multiattribut ne prétend pas être exhaustive, bien au contraire. Toutefois, elle met en contexte le lecteur sur le sujet en question et l'informe sur les principales étapes à suivre, de même que sur les différences de paradigmes entre les deux écoles de pensées dominantes. Notons que plusieurs autres méthodes existent en aide à la décision multiattribut, nous n'avons fait ici qu'un bref survol de l'inventaire actuellement accessible.

Glossaire

Les termes les plus propices à une mésinterprétation en aide à la décision multiattribut sont définis ici-bas. Ceux-ci sont : attribut, critère, pouvoir discriminant, performance et échelle de préférence.

Attribut: un attribut est une caractéristique permettant de décrire chaque action de l'ensemble de choix auxquels fait face le décideur. Par exemple, cette caractéristique peut être le prix, la qualité et la fiabilité si le choix porte sur un produit. Dans son choix parmi les actions de l'ensemble de choix, le décideur utilise de telles caractéristiques (au moins une) qui lui servent d'axes d'évaluation. Ces axes d'évaluation sont des attributs des actions, c'est pourquoi on les appelle « attributs », on peut également rencontrer l'expression « axe d'évaluation » et « caractéristique » (Pomerol et Barba-Romero, 1993).

Critère: la première définition du terme critère que nous pouvons regarder est celle du dictionnaire dans « Le Larousse des noms communs ». Cette définition générale va comme suit : « Caractère, principe qui permet de distinguer une chose d'une autre, d'émettre un jugement, une estimation ». C'est une définition plutôt floue, nous devons l'avouer, cependant, celle de Roy (2000), qui est une référence dans le domaine, est plus rigoureuse : « Outil construit pour évaluer et comparer des actions potentielles selon un point de vue bien précis ».

Pour qu'un critère soit accepté par tous les preneurs de décision (*decision maker* (DM)), ledit critère ne devrait pas être influé, d'une façon décisive, par des perceptions du système de valeurs que certains d'entre eux seraient guidés à rejeter. Cela se traduit par le fait que le sens de variation de la préférence le long de l'échelle ne peut mener à une contestation. Toutefois, ceci ne veut pas dire qu'il soit improbable que les DM aient de grandes divergences quant à l'importance relative allouée à chacun des critères : un critère peut être perçu très important

pour certains DM, alors que d'autres le jugeront comme étant moins important. Dans un sens, c'est ce qui fait la force de l'union des différentes perceptions des DM.

Roy (1985) définit un vrai critère comme une fonction-critère g telle que :

$$g(a') \geq g(a) \Rightarrow \begin{cases} a' I_g a \text{ si } g(a') = g(a) \\ a' P_g a \text{ si } g(a') > g(a) \end{cases} \quad (\text{A V-3})$$

où

$g(a')$ et $g(a)$ sont deux nombres associés à des actions idéales pouvant être comparées;
 I_g et P_g : représentent respectivement une indifférence et une préférence stricte restreinte à l'axe de signification g .

Découlant de cette définition, on peut considérer que, pour un vrai critère :

- il ne peut y avoir indifférence (restreinte à l'axe de signification de g) entre a et a' que si $g(a) = g(a')$;
- toute différence positive $g(a') - g(a)$ est notée comme caractéristique d'une préférence stricte (restreinte à l'axe de signification de g) en faveur de a' .

De sorte qu'avec un vrai critère, on ne peut que discriminer, sans aucune nuance, des situations d'indifférence et des situations de préférence stricte et exclure toute situation de préférence faible. Dès lors, nous pouvons dire que tout vrai critère détient ainsi un pouvoir discriminant absolu (Roy, 1985).

Pouvoir discriminant: toujours selon Roy (1985), ce pouvoir discriminant d'une fonction-critère g provient de l'aptitude du DM pour discriminer des situations de préférence stricte, d'indifférence et de préférence faible sur la base d'une plus ou moins grande importance de la

différence $g(a') - g(a)$. Donc, le pouvoir discriminant permet le jugement des performances des situations par rapport aux différents critères étudiés.

Vansnick (2009) nous précise également que la propriété du critère à pouvoir servir de base à l'expression de jugement d'appréciation signifie :

- qu'il est possible de distinguer, pour chaque critère, plusieurs niveaux de performance pouvant être atteints sur ce critère (sans quoi, il n'y aurait rien à « apprécier » relativement à ce critère; ce critère n'aurait aucun pouvoir discriminant et serait du même coup superflu);
- que les DM peuvent avoir des jugements d'appréciation (en ce qui concerne les niveaux de performance) d'un critère indépendamment des performances évoquées sur les autres critères (c'est une question d'indépendance des critères au sens des préférences).

Les jugements d'appréciation, selon Vansnick (2009), prennent généralement l'une des deux formes suivantes : la première est l'ordonnancement des éléments à évaluer par ordre d'attractivité décroissante (information préférentielle ordinaire) et la deuxième est l'affiliation à chaque élément à évaluer d'un nombre attribué à mesurer son attractivité relative (information préférentielle cardinale).

Performance: l'évaluation d'une action vis-à-vis un critère se confirme par sa performance, qui se traduit par sa position sur une échelle de performance. Cette échelle permet donc de positionner les performances des actions dans le but de pouvoir les comparer. Ainsi, deux actions se comparent selon le point de vue établi comme se comparent leurs performances (Roy, 2000). Il est alors fondamental que la famille cohérente de critères privilégiée soit jugée légitime (exigence d'adhésion) par chacun des DM et que ceux-ci comprennent (exigence de compréhension) la façon dont leurs préoccupations sont évoquées dans le

tableau des performances. Cette bonne compréhension présume d'ailleurs que les termes dans lesquels la performance est énoncée pour chacun des critères (unité si l'échelle est quantitative, description de l'échelon si l'échelle est qualitative, etc.) soient facilement intelligibles pour la totalité des DM et pas uniquement pour les initiés. Lorsque les performances sont évaluées, l'étape suivante est la modélisation des préférences par le truchement de l'échelle de préférence.

Échelle de préférence: elle est définie selon Roy (2000), comme étant un :

Ensemble d'éléments, appelés échelons, rangés selon un ordre complet; chaque échelon est caractérisé soit par un nombre, soit par un énoncé verbal; il sert à traduire l'évaluation d'une action en prenant en compte des effets et attributs clairement précisés; relativement à ceux-ci et toutes autres choses égales par ailleurs, le rangement des échelons reflète le sens de variation de la préférence vis-à-vis des situations qu'ils servent à caractériser. (Roy, 2000, p. 3)

L'échelle de préférence est donc l'outil permettant le positionnement des préférences des actions (projets), dans le but de pouvoir les comparer.

ANNEXE VI

DÉFINITIONS DES ATTRIBUTS CONDITIONNELS ET DE LEURS ÉCHELONS

Valeur de l'attribut	Signification
AccepOper = Acceptabilité des opérateurs	
1	Aucun des utilisateurs initiaux n'a accepté et adopté le nouvel équipement.
2	Environ 25 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement. Les 75 % résiduels sont retournés avec l'ancien équipement.
3	Environ 50 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement. Les 50 % résiduels sont retournés avec l'ancien équipement.
4	Environ 75 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement. Les 25 % résiduels sont retournés avec l'ancien équipement.
5	Tous les utilisateurs initiaux ont accepté et adopté le nouvel équipement.
Habil = Niveau d'habileté requis	
1	Le niveau d'habileté requis est difficilement atteignable.
2	Le niveau d'habileté requis est élevé, peut s'acquérir à long terme avec la pratique.
3	Le niveau d'habileté requis est moyen, peut s'acquérir à moyen terme avec la pratique.
4	Le niveau d'habileté requis est léger, peut s'acquérir facilement avec un peu de pratique.
5	Aucune habileté spéciale n'est requise.
Standard = Niveau de standardisation du nouvel équipement p/r à l'ancien	
1	Aucune comparaison possible (rupture complète dans le mode d'exécution de la tâche).
2	Forte différence (une ou deux modification(s) importante(s) transforme(nt) une partie du mode d'exécution de la tâche).
3	Moyenne différence (plusieurs modifications mineures qui ont comme objectif d'améliorer l'exécution de la tâche).
4	Faible différence (une ou deux modification(s) mineure(s) qui ont comme objectif d'améliorer l'exécution de la tâche).
5	Pratiquement la même chose (les modifications sont invisibles dans l'exécution de la tâche).
EspaceTrav = Qualité de l'espace de travail	
1	Médiocre, plusieurs aspects sont à améliorer. Lesquels?
2	Ordinaire, au moins deux aspects à améliorer. Lesquels?
3	Bien en général.
4	Très bien, sauf un aspect que l'on pourrait peut-être améliorer. Lequel?
5	Excellent sur tous les aspects.

ImpUtilImpl = Implication des utilisateurs dans l'implantation	
1	Aucune implication (indifférence dans la réussite de l'implantation).
2	Participation passive: implication légère de la part des opérateurs.
3	Participation jugée entre passive et active.
4	Participation active, mais n'a pas menée à l'optimisation de l'utilisation du nouvel équipement rapidement.
5	Participation active menant à l'optimisation de l'utilisation du nouvel équipement rapidement.
Vision = Qualité du champ de vision	
1	Médiocre, toujours un ou deux aspects qui rendent la visibilité difficile/dangereuse.
2	Ordinaire, souvent un ou deux aspects qui rendent la visibilité difficile/dangereuse.
3	Bien en général.
4	Très bien, sauf un aspect que l'on pourrait peut-être améliorer.
5	Excellente sur tous les aspects.
Siege = Qualité du siège	
1	Qualité décevante.
2	Qualité ordinaire.
3	Bien, mais une ou deux faiblesses.
4	Bien, sans faiblesse.
5	Vraiment bien.
ImpFabImpl = Implication des fabricants dans l'implantation	
1	Vente uniquement, sans plus.
2	Suivi jugé insatisfaisant lors de la période de rodage.
3	Suivi jugé OK lors de la période de rodage.
4	Suivi jugé satisfaisant lors de la période de rodage.
5	Suivi jugé très satisfaisant lors de la période de rodage.
ExpPoste = Expérience en années sur le poste	
	Correspond à la médiane pour l'ensemble des utilisateurs.
ExpMine = Expérience en années comme travailleur à cette mine	
	Correspond à la médiane pour l'ensemble des utilisateurs.
Age = Âge à l'arrivée de l'équipement innovant	
	Correspond à la moyenne pour l'ensemble des utilisateurs.

APPENDICE A

CERTIFICATS D'ÉTHIQUE



Comité d'éthique de la recherche École de technologie supérieure

Date : 20 décembre 2013

Renouvellement

OBJET : **Titre du projet :** Étude de l'évolution des innovations technologiques, de la productivité et de la performance en santé et en sécurité au travail dans le domaine minier aurifère témiscabitibien : une étude longitudinale portant sur la dernière décennie
Responsable du projet : Sylvie Nadeau
Décision : APPROBATION FINALE

Madame,

La demande de renouvellement pour le projet de recherche mentionné en rubrique a été déposée le 6 décembre 2013 pour évaluation par le comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS. La présente lettre est pour vous informer que le CÉR de l'ÉTS a procédé le 18 décembre 2013, à l'évaluation du dossier en comité restreint.

Liste des documents soumis pour évaluation :

- Formulaire de demande de renouvellement

J'ai le plaisir de vous informer que suite à l'analyse des documents que vous nous avez soumis, le projet a été **accepté sans condition**.

Veuillez toutefois noter que cette approbation n'est valable que pour une année. Vous devrez donc annuellement demander le renouvellement de l'approbation au Comité, sans quoi le projet sera considéré comme terminé. Dans cette perspective, vous devrez fournir un rapport final suivant le modèle disponible sur la page Internet de l'ETS. Ce rapport est attendu pour le 31 mai 2015.

Veuillez agréer, Madame, l'expression de mes sentiments les meilleurs.



Paul V. Gervais, Ing., M.Eng.
Président
Comité d'éthique de la recherche

DATE DE FIN DE L'APPROBATION
20 décembre 2014

c.c. : Claude Bedard, doyen de la recherche



**Université du Québec
en Abitibi-Témiscamingue**

445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone: (819) 762-0971 Télécopieur: (819) 797-4727

Le 8 août 2012

Madame Caroline Chartrand
Conseillère recherche, innovation et partenariats
Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure
1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal (Québec) H3C 1K3

OBJET : Réception de documents dans le cadre de l'Entente pour la reconnaissance des certificats d'éthique des projets de recherche à risque minimal (Kazimierz Zaras)

Projet : «*Étude de l'évolution des innovations technologiques, de la productivité et de la performance en santé et en sécurité au travail dans le domaine minier aurifère témiscabitibien : une étude longitudinale portant sur la dernière décennie*»

Madame,

Le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains accuse réception des documents que vous nous avez transmis en date du 4 juillet 2012 pour le projet cité en rubrique.

Comme le niveau de risque de ce projet nous apparaît clairement se situer sous le seuil du risque minimal, le CÉR-UQAT appuie sans aucune réserve l'approbation éthique du Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'École de technologie supérieure.

En vous souhaitant le meilleur succès dans la poursuite de vos travaux, je vous prie de recevoir, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs.


Manon Champagne, Ph.D.
Présidente
Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains
(CÉR) – UQAT

MC/md

c.c. : Mme Sylvie Nadeau, directrice de thèse de M. Bryan Boudreau-Trudel - ÉTS
M. Kazimierz Zaras, professeur à l'UER en sciences de la gestion



**Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure**

Date : 4 juillet 2012

OBJET : **Titre du projet :** Étude de l'évolution des innovations technologiques, de la productivité et de la performance en santé et en sécurité au travail dans le domaine minier aurifère témiscabitibien : une étude longitudinale portant sur la dernière décennie

Responsable du projet : Sylvie Nadeau

Décision : APPROBATION FINALE

Madame,

Les modifications et précisions demandées par le CÉR dans sa lettre du 7 juin 2012 ayant été apportées adéquatement, votre projet peut aller de l'avant.

Veuillez toutefois noter que cette approbation n'est valable que pour une année. Vous devrez donc annuellement demander le renouvellement de l'approbation au Comité, sans quoi le projet sera considéré comme terminé. Dans la perspective où il devait être terminé, vous devrez fournir un rapport final suivant le modèle disponible sur la page Internet de l'ÉTS. Ce rapport est attendu pour le 31 décembre 2013.

Veuillez agréer, Madame, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Caroline Chartrand, M.Sc.
Coordonnatrice
Comité d'éthique de la recherche

c.c. : Claude Bédard, doyen de la recherche
 Paul Gervais, président du CÉR de l'ÉTS

APPENDICE B

DOCUMENTS: COLLECTE DE DONNÉES

PROJET : _____ (date d'implantation: _____)

Équipement : _____ VS Équipement : _____

Poste de la personne interviewée: _____

Date de l'interview: _____

Qu'est-ce qui a motivé cette acquisition? _____

A-t-elle permis une économie de coûts selon vous? _____

A-t-elle permis une amélioration de la fiabilité? _____

A-t-elle permis une amélioration des conditions de travail? _____

1. Niveau d'acceptation de l'opérateur face à la nouvelle technologie

Parlez-moi du niveau d'acceptation des opérateurs au moment de l'arrivée de la nouvelle machinerie.

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucun des utilisateurs initiaux n'a accepté et adopté le nouvel équipement
2	Environ 25 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement. Les 75 % résiduels sont retournés avec l'ancien équipement.
3	Environ 50 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement. Les 50 % résiduels sont retournés avec l'ancien équipement.
4	Environ 75 % des utilisateurs ont accepté et adopté le nouvel équipement. Les 25 % résiduels sont retournés avec l'ancien équipement.
5	Tous les utilisateurs initiaux ont accepté et adopté le nouvel équipement

2. Niveau d'habileté requis

La nouvelle machinerie nécessite-t-elle un niveau d'habileté plus élevé ou spécial? Et si oui à quel degré selon vous?

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucune habileté spéciale n'est requise
2	Le niveau d'habileté requis est léger, peut s'acquérir facilement avec un peu de pratique
3	Le niveau d'habileté requis est moyen, peut s'acquérir à moyen terme avec la pratique
4	Le niveau d'habileté requis est élevé, peut s'acquérir à long terme avec la pratique
5	Le niveau d'habileté requis est difficilement atteignable

3. Niveau de standardisation (fonctionnalités) du nouvel équipement par rapport aux autres

Décrivez-moi le nouvel équipement en le comparant à l'ancien. Quels sont les changements au point de vue des fonctionnalités?

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucune comparaison possible (rupture complète dans le mode d'exécution de la tâche).
2	Forte différence (une ou deux modification(s) importante(s) transforme(nt) une partie du mode d'exécution de la tâche).
3	Moyenne différence (plusieurs modifications mineures qui ont comme objectif d'améliorer l'exécution de la tâche)
4	Faible différence (une ou deux modification(s) mineure(s) qui ont comme objectif d'améliorer l'exécution de la tâche).
5	Pratiquement la même chose (les modifications sont invisibles dans l'exécution de la tâche).

4. Niveau de standardisation (avertissements/alarmes) du nouvel équipement par rapport aux autres

Décrivez-moi le nouvel équipement en le comparant à l'ancien. Y a-t-il des changements en ce qui concerne les alarmes et avertissements (emplacement, couleur, son, intensité, 2^e alarme) ?

emplacement, couleur, son, intensité, 2^e alarme

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucun ou seulement un de ces cinq aspects sont pratiquement identiques Lequel?
2	Deux de ces cinq aspects sont pratiquement identiques Lesquels?
3	Trois de ces cinq aspects sont pratiquement identiques Lesquels?
4	Quatre de ces cinq aspects sont pratiquement identiques Lequel est différent?
5	Ces cinq aspects sont pratiquement identiques

5. Niveau d'intégration de multiples avertissements et/ou alarmes

Est-ce que les avertissements/alarmes du nouvel équipement s'intègrent bien avec ceux déjà existants? Y a-t-il des faiblesses? Y a-t-il des forces?

Valeur de l'attribut	Signification
1	Constat d'échec ; une ou plusieurs incompatibilités dangereuses Lesquelles?
2	Intégration +/- bien réussie
3	Intégration généralement réussie, avec une ou deux faiblesses toujours à régler. Lesquelles?
4	Intégration réussie, les faiblesses ont été corrigées lors du rodage
5	Intégration parfaite, sans faiblesses initiales

6. Niveau de formation

Parlez-moi du niveau de formation des opérateurs au moment de l'arrivée de la nouvelle machinerie.

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucune formation spécifique
2	Accompagnement avec entraîneur d'expérience
3	Formation par formateur de la mine (sans formation spécifique sur ce véhicule par le manufacturier) + période d'accompagnement avec entraîneur d'expérience sur ce type de véhicule
4	Formation par formateur de la mine (ayant reçu une formation spécifique sur ce véhicule par le manufacturier) + période d'accompagnement avec entraîneur sans expérience sur ce type de véhicule
5	Formation par formateur de la mine (ayant reçu une formation spécifique sur ce véhicule par le manufacturier) + période d'accompagnement avec entraîneur d'expérience sur ce type de véhicule

7. Niveau d'implication des fabricants dans l'implantation

Parlez-moi de l'implication des fabricants lors de l'implantation du nouvel équipement (vente seulement, service de formation, suivi lors de la période de rodage, rétroaction, etc.).

Valeur de l'attribut	Signification
1	Vente uniquement, sans plus
2	Suivi jugé insatisfaisant lors de la période de rodage
3	Suivi jugé OK lors de la période de rodage
4	Suivi jugé satisfaisant lors de la période de rodage
5	Suivi jugé très satisfaisant lors de la période de rodage

8. Niveau d'implication des utilisateurs dans la conception

Parlez-moi de l'implication des utilisateurs lors de la conception du nouvel équipement (rencontre, participation passive, active, rétroaction, etc.).

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucune implication (achat clé en main)
2	Participation passive (échange d'info seulement), mais non considérée
3	Participation passive (échange d'info seulement) et considérée
4	Participation active
5	Participation action + rétroaction continue pour futur conception

9. Niveau d'implication des utilisateurs dans l'implantation

Parlez-moi de l'implication des utilisateurs lors de l'implantation du nouvel équipement.

Valeur de l'attribut	Signification
1	Aucune implication (indifférence dans la réussite de l'implantation)
2	Participation passive: implication légère de la part des opérateurs
3	Participation active: demande de modification(s) non-réalisée(s) par absence de consensus chez les opérateurs. La ou lesquelles?
4	Participation active: demande de modifications(s) acceptée(s) et réalisée(s), mais qui n'a pas réussi à optimiser <i>rapidement</i> l'utilisation du nouvel équipement. Toujours quelque chose qui fait défaut, quoi?
5	Participation active: demande de modifications(s) acceptée(s) et réalisée(s), et ayant réussi à optimiser <i>rapidement</i> l'utilisation du nouvel équipement.

10. Qualité des sièges au point de vue de l'ergonomie

Parlez-moi de la qualité des sièges du nouvel équipement du point de vue ergonomique (individuellement et comparativement à l'ancien).

Valeur de l'attribut	Signification
1	Qualité décevante. Pourquoi?
2	Qualité ordinaire. Pourquoi?
3	Bien, mais une ou deux faiblesses. Lesquelles?
4	Bien, sans faiblesse
5	Vraiment bien

11. Qualité du champ de vision

Comment qualifiez-vous la qualité du champ de vision de l'opérateur derrière cette nouvelle machinerie (éclairage, angle mort, obstruction partiel, etc.) ?

Valeur de l'attribut	Signification
1	Médiocre, toujours un ou deux aspects qui rendent la visibilité difficile/dangereuse. Lesquels?
2	Ordinaire, souvent un ou deux aspects qui rendent la visibilité difficile/dangereuse. Lesquels?
3	Bien en général
4	Très bien, sauf un aspect que l'on pourrait peut-être améliorer.
5	Excellent sur tous les aspects.

12. Qualité de l'espace de travail

Comment qualifiez-vous la qualité de l'espace de travail de l'opérateur derrière cette nouvelle machinerie (excellente, bien, ordinaire, à améliorer... individuellement ainsi que par rapport à l'ancienne) ?

Valeur de l'attribut	Signification
1	Médiocre, plusieurs aspects sont à améliorer Lesquels?
2	Ordinaire, au moins deux aspects à améliorer Lesquels?
3	Bien en général
4	Très bien, sauf un aspect que l'on pourrait peut-être améliorer Lequel?
5	Excellente sur tous les aspects

13. Niveau de dépendance de l'opérateur face à la technologie

À quel point l'opérateur derrière la nouvelle machinerie est-il en contrôle de celle-ci? Connait-il vraiment toutes ses possibilités (caractéristiques) et le pourquoi de certaines réponses de la machinerie ou s'il n'est pas plutôt dépendant de celle-ci (est-ce qu'il s'est approprié l'équipement)?

Valeur de l'attribut	Signification
1	Très dépendant, ne comprend pas les possibilités, ni les réponses de l'équipement
2	Dépendant sur plusieurs actions/réponses de l'équipement
3	+/- dépendant
4	Indépendant (connait l'équipement), sauf pour une ou deux caractéristiques
5	Aucune dépendance, connaissances pointues de l'équipement

14. Niveau d'identification des dangers

Lors de l'arrivée du nouvel équipement, avez-vous pris le temps d'identifier tous les dangers possibles.

Valeur de l'attribut	Signification
1	Continuité avec ancien équipement
2	Identification par X, transmise oralement lors de la formation
3	Identification par X, écrite dans les procédures et discutée en formation (sans réévaluation)
4	Identification par X, écrite dans les procédures, discutée dans les formations et réévaluation informelle.
5	Identification par X, écrite dans les procédures, discutée dans les formations et réévaluation formelle sur une base périodique.

15. Peut-on faire un lien avec le succès de l'implantation et le bonus?

16. Selon vous, y a-t-il qqch qui a pu influencer positivement ou négativement la réussite de l'implantation?

DONNÉES POUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE EN PRODUCTIVITÉ

DONNÉES POUR L'INDICATEUR DE PERFORMANCE EN SST

PROJET :						
DESCRIPTION :						
FABRICANT :						
MODÈLE :						
# MACHINE :						
DATE IMPLANT. :						
MOIS	# Événement	Date	Nom employé	# Machine	Descriptif de l'événement	Heures (utilisation équipements)
1er mois						
...						
...						
...						
...						
...						
...						
...						
...						
...						
12e mois						
Total 12 mois						

APPENDICE C

SHAPIRO-WILK NORMALITY TESTS

Innovative groups																
	Bolters						Drills			Trucks						
	Project 1			Project 1.5			Project 2			Project 3			Project 4		Project 5	
	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/H	Avail	\$/H	Avail
Shapiro-Wilk value	0.940	0.969	0.937	0.940	0.969	0.937	0.888	0.876	0.927	0.925	0.963	0.906	0.948	0.940	0.963	N/A
P-value	0.504	0.901	0.460	0.504	0.901	0.460	0.135	0.079	0.350	0.362	0.805	0.188	0.614	0.548	0.813	
	LHDs						Tractors						Scissor Lifts			
	Project 6		Project 7		Project 8		Project 9		Project 10							
	\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail	\$/H	Avail
Shapiro-Wilk value	0.972	0.980		0.938	0.924		0.907	0.919		0.948	0.936		0.912	0.683		
P-value	0.932	0.983		0.557	0.325		0.197	0.279		0.670	0.443		0.226	0.001		
	Standard groups															
	Bolters						Drills			Trucks						
	Project 2			Project 3			Project 4			Project 2			Project 4		Project 5	
	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/H	Avail	\$/H	Avail
Shapiro-Wilk value	0.943	0.948	0.920	0.903	0.917	0.943	0.928	0.869	0.947	0.865	0.962	0.879	0.911	0.975	0.842	N/A
P-value	0.538	0.613	0.285	0.172	0.265	0.543	0.386	0.064	0.591	0.056	0.798	0.084	0.253	0.958	0.029	
	LHDs						Tractors						Scissor Lifts			
	Project 6		Project 7		Project 8		Project 9		Project 10							
	\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail	\$/H	Avail
Shapiro-Wilk value	0.914	0.965		0.765	0.931		0.902	0.898		0.839	0.823		0.918	0.869		
P-value	0.239	0.848		0.018	0.523		0.169	0.149		0.098	0.069		0.300	0.064		

FISHER TESTS FOR THE EQUALITY OF VARIANCES

APPENDICE D

	Bolters						Drills					
	Project 1			Project 1.5			Project 2			Project 3		
	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail	\$/M	\$/H	Avail
F value	3.0462	0.7959	12.0170	1.1118	0.3230	9.3865	0.5517	0.4249	0.2210	0.0475	0.1217	0.2070
Reject H0 if:												
F >	2.818	2.818	2.818	2.818	2.818	2.818	2.978	2.818	2.818	2.854	2.978	2.818
F <	0.3549	0.3549	0.3549	0.3549	0.3549	0.3549	0.3358	0.3549	0.3549	0.3398	0.3358	0.3549
Decision	H1	H0	H1	H0	H1	H1	H0	H0	H1	H1	H1	H1
Variance	Unequal	Pooled	Unequal	Pooled	Unequal	Unequal	Pooled	Pooled	Unequal	Unequal	Unequal	Unequal
	Trucks						LHDs					
	Project 4		Project 5		Project 6		Project 7					
	\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail	
F value	0.5887	2.9130		0.2165			2.4144	3.0881		0.5467	1.1808	
Reject H0 if:												
F >	2.978	2.896		2.854			2.818	2.818		4.147	3.603	
F <	0.3358	0.3224		0.3398			0.3549	0.3549		0.2793	0.3320	
Decision	H0	H1		H1			H0	H1		H0	H0	
Variance	Pooled	Unequal		Unequal			Pooled	Unequal		Pooled	Pooled	
	Tractors						Scissor Lifts					
	Project 8		Project 9		Project 10							
	\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail		\$/H	Avail	
F stat	0.7810	0.1655		0.0032	0.4858		0.6856	0.4702				
Reject H0 if:												
F >	2.818	2.818		4.147	4.027		2.943	2.818				
F <	0.3549	0.3549		0.2793	0.3231		0.3504	0.3549				
Decision	H0	H1		H1	H0		H0	H0				
Variance	Pooled	Unequal		Unequal	Pooled		Pooled	Pooled				

APPENDICE E

LISTE DES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA THÈSE

Articles publiés ou acceptés dans des revues scientifiques avec comité de lecture

1. Boudreau-Trudel, B., K. Zaras, S. Nadeau et I. Deschamps. 2014a. « Introduction of Innovative Equipment in Mining: Impact on Productivity ». *American Journal of Industrial and Business Management*, vol. 4, n° 1, pp. 31-39.
2. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014b. « Introduction of Innovative Equipment in Mining: Impact on OHS ». *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 4, pp. 49-58.
3. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014c. « Managing Equipment Innovations in Mining: a Review ». *WORK: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, Special Issue on Occupational Ergonomics and Safety* (accepté, avril 2014).

Articles en révision ou soumis à des revues scientifiques avec comité de lecture

1. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014d. « Introduction d'équipements miniers innovants : les facteurs clés pour une implantation réussie ». *Travail et Santé* (soumis, avril 2014).

Conférences avec comité de lecture

1. Boudreau-Trudel, B., K. Zaras, S. Nadeau et I. Deschamps. 2014. « Les facteurs de réussite dans l'implantation de projets d'équipement minier innovant ». *Local and Regional Projects – the Role of Competencies*, 10-11 juin, Katowice, Pologne.
2. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2013. « L'innovation dans le domaine minier : ses impacts et sa gestion ». *Les conférences scientifiques de l'ÉREST*, École de technologie supérieure, Travail et Santé, vol. 29, n° 2, pp. 22.

3. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2013. « Les facteurs clés pour la réussite d'une implantation d'innovation minière ». *Congrès de l'AQHSST*, 1 au 3 mai, Bromont, Canada. (Récipiendaire d'une bourse de participation et d'un Prix pour la meilleure présentation).
4. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2012. « The Impact of New Technology in Mining Equipment on Productivity and OHS Performance ». *Nordic Ergonomics Society (NES)*, 19 au 22 août, Stockholm, Suède.
5. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2012. « The Importance of Identifying Factors Determining Successful Implementation of Innovation in Mining – A Review of the Literature on the Impact of Technological Innovation on Productivity and OHS Performance ». *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GFA)*, 22 au 24 février, Kassel, Allemagne.

Conférencier invité

1. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014. « Dix implantations de projets innovants en équipement minier : leurs impacts et leurs facteurs de réussite ». *Colloque annuel de l'Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail secteur minier (ASP-Mines)*, 19 mars, Val-d'Or, Canada.

Conférences sans comités de lecture

1. Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2013. « La gestion performante de l'innovation minière : résultats d'une recherche menée auprès de dix projets innovants ». *Les conférences scientifiques de l'ÉREST*, École de technologie supérieure, 12 décembre, Montréal, Canada.

Présentation par affiche

1. Boudreau-Trudel, B. 2011. « Impacts socio-économiques de l'industrie minière en Abitibi-Témiscamingue ». *Concours de l'ÉREST*, École de technologie supérieure, 30 janvier, Montréal, Canada.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Association minière du Québec (AMQ). 2010. « 76 % moins d'accidents dans les mines du Québec depuis 20 ans ». In *Association minière du Québec*. En ligne. <http://www.amq-inc.com/index.php?option=com_content&task=view&id=77&Itemid=1>. Consulté le 22 mars 2010.
- Association minière du Québec (AMQ). 2011. « Design de mine, un patron complexe ». Dépliant spécial : Designers de mines. *Le Citoyen Rouyn-Noranda*, le mercredi 23 mars 2011, p. 2.
- Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier (APSM). 2010. *Rapport annuel 2009 : le client, notre raison d'être*. Québec, 13 p.
- Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier (APSM). 2013. « Évolution des heures travaillées (en millions), de la fréquence et de la gravité au 31 août 2013 ». In *Info-statistiques*. En ligne. <<http://aspmines.qc.ca/info-statistiques/>>. Consulté le 10 décembre 2013.
- Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier (APSM). 2014. « Évolution des heures travaillées (en millions), de la fréquence et de la gravité au 31 décembre 2013 ». In *Info-statistiques*. En ligne. <<http://aspmines.qc.ca/info-statistiques/>>. Consulté le 12 mars 2014.
- Atlas Copco. 2010. « L'innovation par le partenariat ». In *Achieve*. En ligne. 4 p. http://www.atlascopco.com/microsites/Images/FR24-27_Atlas_Copco_Achieve_2010-11_Linnovation_par_le_partenariat_tcm717-1441643.pdf. Consulté le 9 septembre 2011.
- Atun, R. 2012. « Health systems, systems thinking and innovation ». *Health Policy and Planning*, vol. 27, p. 4-8.
- Australian Bureau of Statistics. 1998. *Innovation in mining, Australia*. ABS Catalogue n° 8121.0, Gouvernement d'Australie, 16 p.
- Baillargeon, G. 2003. *Statistique appliquée pour les sciences de la gestion et les sciences économiques*. Trois-Rivières : Les Éditions SMG, 730 p.
- Baram M. 2009. « Globalization and workplace hazards in developing nations ». *Safety Science*, vol. 47, p. 756-766.
- Bartos, P. 2007. « Is mining a high-tech industry? Investigations into innovation and productivity advance ». *Resources Policy*, vol. 32, p. 149-158.

- Beaudry, R. 1976. *Comité d'étude sur la salubrité dans l'industrie de l'amiante : Annexe*. S-195. Gouvernement du Québec, 404 p.
- Beaupré, S. 2011. « La perception du risque sous terre: l'exemple des mineurs de fond de l'Abitibi-Témiscamingue ». Thèse de Ph.D. de la Faculté des arts et des sciences, Montréal, Université de Montréal, Montréal, 205 p.
- Berk J. et P. DeMarzo. 2008. *Finance d'entreprise*. Paris : Pearson Education, 1018 p.
- Blanchette, L. 2010. *Faits saillants de l'industrie minière en Abitibi-Témiscamingue et dans le Nord-du-Québec*. Direction de l'analyse sur le marché du travail de l'Abitibi-Témiscamingue, Service Canada, 7 p.
- Blank V.L.G., F. Diderichsen et R. Andersson. 1996. « Technological Development and Occupational Accidents as a Conditional Relationship: A Study of Over Eighty Years in the Swedish Mining Industry ». *Journal of Safety Research*, vol. 27, n° 3, p. 137-146.
- Blaszczyński, J., S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski et M. Szelag. 2013. « jMAF - Dominance-Based Rough Set Data Analysis Framework ». In *Rough Sets and Intelligent Systems - Professor Zdzisław Pawlak in Memoriam*, sous la dir. de Skowron, A. et Z. Suraj (Eds.): Rough Sets and Intelligent Systems, ISRL 42, p. 185-209. Berlin : Springer-Verlag.
- Boly, V. 2008. *Ingénierie de l'innovation : organisation et méthodologies des entreprises innovantes*, 2^e édition revue et augmentée. Paris : Lavoisier, 244 p.
- Booz, Allen et Hamilton Inc. 1982. *New Product Management for the 1980s*. New York : Booz, Allen and Hamilton Inc., 24 p.
- Boudreau-Trudel, B. 2010. « Élaboration d'un modèle pratique d'aide à l'évaluation et à la classification des projets d'investissement : le cas des projets soumis à la SADC Harricana Inc. ». Mémoire de maîtrise en gestion des organisations, Rouyn-Noranda, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 205 p.
- Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2012. « The Impact of Technological Innovation on Productivity and OHS Performance in Mining ». In *Proceedings of the 44th Annual International Nordic Ergonomics and Human Factors Society Conference (NES2012)*. (Saltsjöbaden, Sweden, Aug. 19-22 2012).
- Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2013. « Les facteurs clés pour la réussite d'une implantation d'innovation minière ». In *Congrès de l'AQHSST*. (Bromont, Canada, May 1-3 2013).

- Boudreau-Trudel, B., K. Zaras, S. Nadeau et I. Deschamps. 2014a. « Introduction of Innovative Equipment in Mining: Impact on Productivity ». *American Journal of Industrial and Business Management*, vol. 4, n° 1, p. 31-39.
- Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014b. « Introduction of Innovative Equipment in Mining: Impact on OHS ». *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 4, pp. 49-58.
- Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014c. « Managing Equipment Innovations in Mining: a Review ». *WORK: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, Special Issue on Occupational Ergonomics and Safety (accepté, avril 2014).
- Boudreau-Trudel, B., S. Nadeau, K. Zaras et I. Deschamps. 2014d. « Introduction d'équipements miniers innovants : les facteurs clés pour une implantation réussie ». *Travail et Santé* (soumis, avril 2014).
- Brans, J.P. 1982. « L'ingénierie de la décision. Élaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE ». In *L'aide à la décision : Nature, instruments et perspectives d'avenir*, sous la dir. de Nadeau, R et M. Landry, p. 183-214. Québec : Presses de l'Université Laval.
- Brans, J.P. et B. Mareschal. 2002. *PROMÉTHÉE-Gaia une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles : Éditions Ellipses, 187 p.
- Broustail, J. et F. Frery. 1993. *Le management stratégique de l'innovation*. Coll. « Précis ». Paris : Éditions Dalloz, 230 p.
- Bullock, R. 2000. « Trends in Non-Coal Underground Mining Technology at the Close of the Millennium ». *Proceedings of the American-Polish Mining Symposium*. (Las Vegas, S.D.), p. 127-144.
- Centre for Excellence in Mining Innovation (CEMI). 2013. « Mine Automation - A Vision of Our Future ». In *Ultra Deep Mining Workshop*. (Sudbury, June 12-13 2013).
- Centre for Excellence in Mining Innovation (CEMI). 2014. « CEMI Awarded \$15 Million for Ultra-Deep Mining Network ». In *Press Releases – January 21, 2014*. En ligne. <<https://www.miningexcellence.ca/?p=3095>>. Consulté le 10 février 2014.
- Chadwick, J. 2008. « Moving ore efficiently ». *International Mining*, (June), p. 38-46.
- Chakhar, S. et I. Saad. 2012. « Dominance-based rough set approach for groups in multicriteria classification problems ». *Decision Support Systems*, vol. 54, p. 372-380.

- Charles, A. et F. Baddache. 2006. *Prévenir les risques : agir en organisation responsable*. La Plaine Saint-Denis Cedex : AFNOR, 193 p.
- Chesbrough, H.W. 2003. *Open Innovation : The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Boston : Harvard Business School Press, 225 p.
- Christensen, C.M. 1992. « Exploring the limits of the technology S-curve, Part I : Components Technologies ». *Production and Operations Management*, vol. 1, n° 4, p. 334-357.
- Christensen, C.M. 1997. *The innovator's dilemma : when new technologies cause great firms to fail*. Boston : Harvard Business School Press, 252 p.
- Coleman, P.J. et J.C. Kerkering. 2007. « Measuring mining safety with injury statistics : Lost workdays as indicators of risk ». *Journal of Safety Research*, vol. 38, p. 523-533.
- Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). 2011. « Principaux risque de lésions par secteur d'activité ». In *CSST : La prévention, j'y travaille!* En ligne. <http://www.csst.qc.ca/portail/fr/prevention/portrait_des_risques/SelectionSecteur.htm>. Consulté entre le 1er février et le 31 juillet 2011.
- Confrey, J. 1994. « Voix et perspective : à l'écoute des innovations épistémologiques des étudiants et des étudiantes ». *Revue des sciences de l'éducation*, vol. 20, n° 1, p. 115-134.
- Conseil canadien de l'innovation minière (CCIM). 2010. « Des cerveaux innovateurs en mines novatrices ». *InnovaMine*, n° 3, (juillet), p. 1-4.
- Cranstone, D.A. 2002. *Historique de l'exploration minière et de l'exploitation minière au Canada et perspectives pour l'avenir*. Catalogue n° M35-51/2002F, Ottawa : Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 58 pages.
- Cucherat, M. 2009. « Principe général des tests statistiques ». In *Test statistique*. En ligne. <http://www.spc.univ-lyon1.fr/polycop/principe_du_test_statistique.htm>. Consulté le 18 janvier 2014.
- Deschamps, I. 2011a. *GES-845 : Stratégie et analyse de marché, Séance 5 et 6 : Stratégie, diagnostic, positionnement et cueillette d'info*. Programme de 2^e cycle en gestion de l'innovation. Montréal : École de technologie supérieure, 43 p.
- Deschamps, I. 2011b. *GES-845 : Stratégie et analyse de marché, Séance 2 – Partie 2 : La modélisation du processus d'innovation*. Programme de 2^e cycle en gestion de l'innovation. Montréal : École de technologie supérieure, 124 p.

- Deschênes, A.J., H.L. Bilodeau, L. Bourdages, H. Dionne, P. Gagné et A. Rada-Donath. 1996. « Constructivisme et formation à distance ». *Revue Distance*, vol. 1, n° 1, p. 9-25.
- Dessureault, P.C. et M. Doucet. 2003. *Évaluation des indices de contrainte thermique en mines profondes*. Série « Études et recherches », R-350, Montréal : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 34 p.
- Dhillon, B.S. 2009. « Mining equipment safety: A review, analysis methods and improvement strategies ». *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 23, n° 3, p. 168-179.
- Dhillon, B.S. 2010. *Mine Safety: A modern approach*. London: Springer, 186 p.
- Disease Control Priorities Project (DCPP). 2007. *Developing countries can reduce occupational hazards*. Coll. « Disease Control Priorities Project », Fogarty International Center of the U.S. National Institutes of Health/The World Bank/World Health Organization/Population Reference Bureau/Bill & Melinda Gates Foundation, 4 p.
- Doggett, M.D. 2006. « Exploration in the Context of Mineral Supply: Focus on Copper ». In *Thayer Lindsey Lecture*. (Colorado, April 3 2006), Colorado School of Mines.
- Dong, L., D. Neufeld et C. Higgins. 2008. « Testing Klein and Sorra's innovation implementation model : An empirical examination ». *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 25, p. 237-255.
- Donoghue, A.M. 2004. « Occupational health hazards in mining : an overview ». *Occupational Medicine*, vol. 54, p. 283-289.
- Dragt, B.J., F.R. Camisani-Calzolari et I.K. Craig. 2005. « An overview of the automation of load-haul-dump vehicles in an underground mining environment ». In *16th IFAC World Congress*. (Prague, July 4-8 2005).
- Drucker, P.F. 1985. *Innovation and Entrepreneurship : Practice and Principles*. New York : HarperBusiness, 277 p.
- Dufresne, A., P. Loosereewanich, M. Harrigan, P. Sébastien, G. Perrault et R. Bégin. 1993. « Pulmonary dust retention in a silicon carbide worker ». *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 54, n°6, (juin), p.327-330.
- Dupuis, J.-P. 2002. « L'impact de la sous-traitance sur la culture professionnelle des mineurs ». In *Santé, Sécurité et Transformation du travail*, sous la dir. de Harrisson, D. et C. Legendre, p. 205-228. Québec, Presses de l'Université du Québec.

- Eger, T., A. Salmoni et R. Whissel. 2004. « Factors influencing load-haul-dump operator line of sight in underground mining ». *Applied Ergonomics*, vol. 35, n° 6, p. 93-103.
- Eger, T., A. Salmoni, A. Cann et R. Jack. 2006. « Whole-body vibration exposure experienced by mining equipment operators ». *Occupational Ergonomics*, vol. 6, p. 121-127.
- Eger, T., J. Stevenson, P.-É. Boileau, A. Salmoni et VibRG. 2008a. « Predictions of Health Risks Associated with the Operation of Load-Haul-Dump Mining Vehicles: Part 1-Analysis of Whole-Body Vibration Exposure Using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 Standards ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, p. 726-738.
- Eger, T., J. Stevenson, P.-É. Boileau, A. Salmoni et VibRG. 2008b. « Predictions of Health Risks Associated with the Operation of Load-Haul-Dump Mining Vehicles: Part 2-Evaluation of Operator Driving Postures and Associated Postural Loading ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, p. 801-815.
- Faucher, A. et M. Lamontagne. 1953. « L'histoire du développement industriel au Québec ». In *Les classiques des sciences sociales*. En ligne. 24 p. <http://classiques.uqac.ca/contemporains/faucher_albert/hist-devel_industriel_qc/hist-devel_industriel_qc.html>. Consulté le 23 février 2011.
- Fortin, M.F. 2010. *Fondements et étapes du processus de recherche : Méthodes quantitatives et qualitatives*, 2e édition. Montréal : Chenelière Éducation, 632 p.
- Fourez, G. 2002. *La Construction des sciences : Les logiques des inventions scientifiques : Introduction à la philosophie et à l'éthique des sciences*, 4e éd. augm. d'une postf. Coll. « Sciences, éthiques, sociétés ». Bruxelles : De Boeck Université, 382 p.
- Gagnon, Y.C. 2005. *L'étude de cas comme méthode de recherche*. Québec : Presses de l'Université du Québec, 128 p.
- Garcia, R. et R. Calantone. 2002. « A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology : a literature review ». *Journal of Product Innovation Management*, vol. 19, p. 110-132.
- Glaserfeld, V.E. 1994. « Pourquoi le constructivisme doit-il être radical ». *Revue des sciences de l'éducation*, vol. 20, n° 1, p. 21-28.
- Graham, C. et V. Evans. 2007a. « The evolution of shaft sinking systems in the Western world and the improvement in sinking rates. Part 2 – Shaft sinking from 1600 to 1800 – The Industrial Revolution ». *CIM Magazine*, vol. 2, n° 6, (September/October), p. 92-94.

- Graham, C. et V. Evans. 2007b. « The evolution of shaft sinking systems in the Western world and the improvement in sinking rates. Part 3 – Shaft sinking from 1800 to 1900 – Cousin Jacks ». *CIM Magazine*, vol. 2, n° 7, (November), p. 91-93.
- Graham, C. et V. Evans. 2008. « The evolution of shaft sinking systems in the Western world and the improvement in sinking rates. Part 6 – Shaft sinking from 1970 to 2007 – mechanical excavation ». *CIM Magazine*, vol. 3, n° 3, (May), p. 75-77.
- Greco, S., B. Matarazzo et R. Slowinski. 2001. « Rough sets theory for multi-criteria decision analysis ». *European Journal of Operational Research*, vol. 129, p. 1-47.
- Le Groupe MISA. 2011. « Projet 500 : Poignée de foreuse à béquille moins vibrante ». In *Promotions des équipements et des services-experts développés par les partenaires des projets*. En ligne. <<http://www.legroupemisa.com/promotion.php>>. Consulté le 9 septembre 2011.
- Groupe de travail sur le permis social. 2010. *Rapport sur la performance du secteur minier 1998-2009*. « Conférence des ministres de l'énergie et des mines de 2010 », Septembre 2010, 41 p.
- Groves, W.A., V.J. Kecojevic et D. Komljenovic. 2007. « Analysis of fatalities and injuries involving mining equipment ». *Journal of Safety Research*, vol. 38, p. 461-470.
- Guay, J.-H. S.D. « Tragédie à la mine Belmoral ». In *Bilan du siècle, Université de Sherbrooke*. En ligne. <<http://bilan.usherbrooke.ca/bilan/pages/evenements/2984.html>>. Consulté le 22 mars 2011.
- Guibert, J. et G. Jumel. 1997. *Méthodologie des pratiques de terrain en sciences humaines et sociales*. Paris : Masson et Armand Colin, 216 p.
- Gustafson, A. 2011. *Automation of Load Haul Dump Machines*. Research Report, Luleå University of Technology, 46 p.
- Hood, M. 2004. « Advances in Hard Rock Mining Technology ». In *Proceedings of the Mineral Economics and Management Society, 13th Annual Conference*. (April 21-23 2004).
- Horberry, T., R. Burgess-Limerick et L. Steiner. 2011. *Human factors for the design, operation, and maintenance of mining equipment*. New York: CRC Press, 227 p.
- Institut de la statistique du Québec. Gouvernement du Québec. 2011. En ligne. <www.stat.gouv.qc.ca/>. Consulté entre 2011 et 2013.

- Jämsä-Jounela, S.L. et G. Baiden. 2009. « Automation and robotics in mining and mineral processing ». In *Springer Handbook of Automation*, sous la dir. de Nof, S.Y., p. 1001-1013. Berlin (Allemagne) : Springer.
- Kane, H., K. Zaras et M. Nowak. 2009. « Using the Dominance-Based Rough Set Approach in production planning and control ». *Journal of Global Business Administration*, vol. 1, n° 1, p. 23-37.
- Kapsali, M. 2011. « Systems thinking in innovation project management : A match that works ». *International Journal of Project Management*, vol. 29, p. 396-407.
- Karmis, M. 2001. *Mine health and safety management*. Littleton : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 455 p.
- Kecojevic, V.J., D. Komljenovic, W.A. Groves et M. Radomsky. 2007. « An analysis of equipment-related fatal accidents in U.S. mining operations: 1995-2005 ». *Safety Science*, vol. 45, p. 864-874.
- Keeney, R.L. et H. Raiffa. 1976. *Decisions with multiple objectives : Preferences and value tradeoffs*. New York : Wiley, 573 p.
- Keeney, R.L. et H. Raiffa. 1999. *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. Cambridge : Cambridge University Press, 569 p.
- Klein, K. et J. Sorra. 1996. « The challenge of innovation implementation ». *The Academy of Management Review*, vol. 21, n° 4, p. 1055-1080.
- Klippel, A., C. Petter et J. Antunes. 2008. « Management Innovation, a way for mining companies to survive in a globalized world ». *Utilities Policy*, vol. 16, p. 332-333.
- Konyukh, V. 2007. « Strategy of Automation for Underground Mining ». In *International Forum of Strategic Technology: IFOST*. (Ulaanbaatar, Oct. 3-6 2007), p. 615-618.
- Kuhn, M.C. 1998. *Managing Innovation in the Minerals*. Littleton (É-U) : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 83 p.
- Kumar, S. 2004. « Vibration in operating heavy haul trucks in overburden mining ». *Applied ergonomics*, vol. 35, n° 6, p. 509-520.
- Laboratory of Intelligent Decision Support Systems (LIDSS). 2014. « Software jMAF ». In *Institute of Computing Science, Poznan University of Technology – Software and Projects*. En ligne. <<http://idss.cs.put.poznan.pl/site/139.html>>. Consulté le 3 avril 2014.

- Labrecque, S. 2001. « Saviez-vous que... Avant les chevaux-vapeurs ». *Le Journal des Belmine*, n° 15, (décembre), p. 2.
- Lambert-Racine, S. et M. St-Pierre. 2010. « Les mines de l’Abitibi-Témiscamingue : un héritage culturel ». Commission de la santé et de la sécurité du travail. *Le Belmine*, n° 29, (juillet), p. 4-5.
- Lampela, H. et H. Kärkkäinen. 2008. « Systems thinking and learning in innovation process ». *International Journal Entrepreneurship and Innovation Management*, vol. 8, n° 2, p. 184-195.
- Lasonde, P. 2006. « Exploration the Life Blood of the Mining Industry ». In *Society of Economic Geologists Conference : Wealth Creation in the Mineral Industry, Integrating Science, Business, and Education*. (14 May 2006), CD-ROM.
- Lavoie, J.-P. 2010. « Sécurité dans les mines : le Québec n'est pas le Chili ». In *Le Soleil : Cyberpresse du 15 octobre 2010*. En ligne. <<http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/affaires/actualite-economique/201010/14/01-4332587-securite-dans-les-mines-le-quebec-nest-pas-le-chili.php>>. Consulté le 23 mars 2011.
- Le Déaut, J.-Y. et H. Revol. 1997. *L'amiante dans l'environnement de l'homme : ses conséquences et son avenir*. « Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques », Rapport d'information n° 41-1997-1998. Enregistré à la Présidence de l’Assemblée nationale le 16 octobre 1997 / Annexe au procès-verbal de la séance du 21 octobre 1998 (Sénat), 135 p.
- Lefrançois, R. 1991. *Dictionnaire de recherche scientifique*. Lennoxville : Les Éditions Némésis, 220 p.
- Le Loarne, S. et S. Blanco. 2009. *Management de l'innovation*. Paris : Pearson Education France, 360 p.
- Lessard, I. 2009. « La sécurité dans les mines : des histoires et des hommes ». *Le Journal des Belmine*, n° 28, (décembre), p. 4-7.
- Lind, D., W. Marchal, R. Mason, S. Gupta, S. Kabadi et J. Singh. 2004. *Statistical Techniques in Business and Economics*, First Canadian Edition, Toronto : McGraw-Hill Ryerson, 889 p.
- Lind, D., W. Marchal, R. Mason, S. Gupta, S. Kabadi et J. Singh. 2007. *Méthodes statistiques pour les sciences de la gestion*. Montréal : Chenelière McGraw-Hill, 732 p.

- Loilier, T. et A. Tellier. 1999. *Gestion de l'innovation : Décider – Mettre en œuvre – Diffuser*. Bayeux : Éditions Management et société, 214 p.
- Lu, Y. et X. Li. 2011. « A study on a new hazard detecting and controlling method: The case of coal mining companies in China ». *Safety Science*, vol. 49, p. 279-285.
- Lynas, D. et T. Horberry. 2011. « Human Factor Issues with Automated Mining Equipment ». *The Ergonomics Open Journal*, vol. 4, p. 74-80.
- Martel, J.M. et M. Bergeron. 1989. *Systèmes d'aide à la décision*. St-Foy (Québec) : Université du Québec, Télé-université, 197 p.
- McAdam, R. et S. Moffett. 2010. « Developing a model of innovation implementation for UK SMEs: A path analysis and explanatory case analysis ». *International Small Business Journal*, vol. 28, n° 3, p. 195-214.
- Meier, O. et G. Schier. 2007. *Gestion du changement*. Paris : Dunod, 701 p.
- Mines Capelton. 2007. « L'Épopée de Capelton ». In *À propos : La grande Histoire*. En ligne. <www.minescapelton.com>. Consulté le 11 avril 2011.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), Gouvernement du Québec. 2009. *Stratégie minérale du Québec : préparer l'avenir du secteur minéral québécois*. Québec : Gouvernement du Québec, 459 p.
- Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec. 2013a. « Mines actives ». En ligne. 1 page. 1 p. <https://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/mines-actives.pdf>. Consulté le 10 janvier 2014.
- Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec. 2013b. « Quelques dates marquantes ». In *Gros plan sur les mines*. En ligne. <www.mrnf.gouv.qc.ca/mines/industrie/industrie-diamant-hier-dates.jsp>. Consulté le 23 février 2014.
- Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD). 2002. « The story of North American mining/mineral ». En ligne. 107 p. http://www.iisd.org/pdf/2002/mmsd_sus_profile.pdf. Consulté le 9 mars 2011.
- Mine Safety and Health Administration (MSHA). 2013. « Mine Injury and Worktime, Quartely ». In *Yearly Reports, January-June 2013 (Preliminary)*. En ligne. 33p. http://www.msha.gov/Stats/Part50/WQ/MasterFiles/MIWQMaster_20132.pdf. Consulté le 5 janvier 2014.

- Naaldenberg, J., L. Vaandrager, M. Koelen, A.M. Wagemakers, H. Saan et K. Hoog. 2009. « Elaborating on systems thinking in health promotion practice ». *Global Health Promotion*, vol. 16, n° 1, p. 39-47.
- Nielsen, K. et H. Gether. 2004. « Innovation as a Contribution to Sustainable Development. A Status Assessment of the Mineral Industry ». In *Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG)*. (Hania, Greece, June 7-9, 2004), p. 329-334.
- OCDE. 1997. *Manuel d'Oslo : Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation*, version révisée. Paris : Éditions OCDE, 103 p.
- OCDE. 2005. *Manuel d'Oslo : Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation*, 3^e éd. Paris : Éditions OCDE, 188 p.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). 2012. *Les gaz d'échappement des moteurs diésel cancérogènes*. « Centre international de la Recherche sur le Cancer », Communiqué de presse n° 213, 12 Juin 2012, 5 p.
- Osisko. 2011. « L'Industrie Minière Québécoise: Une Industrie du Savoir, Créatrice de Richesse pour la Collectivité ». En ligne. 33 p. <http://www.minalliance.ca/pdfs/industrie-miniere-quebecoise-aout-2011.pdf>. Consulté le 20 décembre 2013.
- Ouellet, V. 2004. « Évolution des mines et des conditions des mineurs à travers le siècle ». In *Bilan siècle, Université de Sherbrooke*. En ligne. <<http://www.bilan.usherb.ca/bilan/pages/collaborations/8513.html>>. Consulté le 5 mars 2011.
- Ouellet, S., É. Ledoux, E. Cloutier et P-S. Fournier. 2011. *Conditions d'intégration des nouveaux travailleurs dans le secteur minier : une étude exploratoire (version corrigée)*. Série « Études et recherches », R-650, Montréal : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 28 p.
- Paradis, S. 2003. « Grâce à une nouvelle technologie, finie la pollution au diesel dans les mines souterraines ». *Le Journal des Belmine*, n° 16, (février), p. 7.
- Patterson, J. et S. Shappell. 2010. « Operator error and system deficiencies : Analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS ». *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, p. 1379-1385.
- Paul, P.S. et J. Maiti. 2007. « The role of behavioral factors on safety management in underground mines ». *Safety Science*, vol. 45, p. 449-471.

- Pawlak, Z. 1982. « Rough Sets ». *International Journal of Parallel Programming*, vol. 11, n° 5, p. 341-356.
- Pawlak, Z. 1991. *Rough sets : Theoretical Aspects of Reasoning about Data*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 229 p.
- Pawlak, Z. et R. Slowinski. 1994. « Rough set approach to multi-attribute decision analysis ». Invite Review. *European Journal of Operational Research*, vol. 72, p. 443-459.
- Pawlak, Z., J. Grzymala-Busse, R. Slowinski et W. Ziarko. 1995. « Rough Sets ». *Communications of the ACM*, vol. 38, n° 11, p. 89-95.
- Pawlak, Z. 1996. « Why rough sets? ». In *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. (New-Orleans, Sept. 8-11 1996), vol. 2, p. 738-743.
- Pawlak, Z. 1997. « Rough sets ». In *Rough Sets and Data Mining-Analysis of Imprecise Data*, sous la dir. de Lin, T. et N. Cercone, p. 3-7. Boston : Kluwer Academic Publishers.
- Pépin, Y. 1994. « Savoirs pratiques et savoirs scolaires: une représentation constructiviste de l'éducation ». *Revue des sciences de l'éducation*, vol. 20, n° 1, p. 61- 85.
- Planeta, S. et J. Paraszczak. 2000. « Underground Metalliferous Mining in Canada : Methods and Costs ». In *Proceedings of the American-Polish Mining Symposium*. (Las Vegas, Oct. 8, 2000), p. 106-116.
- Pomerol, J.-C. et S. Barba-Romero. 1993. *Choix multicritère dans l'entreprise : principe et pratique*. Paris : Éditions HERMES, 391 p.
- Prahhalad, C.K. et G. Hamel. 1990. « The Core Competence of the Corporation ». *Harvard Business Review*, Mai-Juin, p. 1-15.
- Rakotomalala, R. 2011. *Test de normalité : Techniques empiriques et tests statistiques*. Version 2.0. (Support écrit), Université Lumière Lyon 2. 59 p.
- Rasmussen, J. 1982. « Human errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations ». *Journal of Occupational Accidents*, vol. 4, p. 311-333.
- Reason, J. 1990. *Human error*. New York : Cambridge University Press, 320 p.
- Regroupement de l'industrie minière. 2011. « Accéder au gisement : un puits, une rampe ou une fosse? ». Documentation spéciale. *Le Citoyen Rouyn-Noranda*, Mercredi 23 mars 2011, 5 p.

- Rendu, J., S. Santiti, P. Hansen et D. White. 2006. « Mine design and costs, and their impact on exploration targets ». In *Wealth Creation in the Minerals Industry: Integrating Science, Business and Education*, sous la dir. de Doggett, M.D et J.R. Parry (Ed.), Special Publication no. 12, p. 263-272. Society of Economic Geologists.
- Rodrigue, P. 2011. « Agnico-Eagle blâmée pour la mort d'un travailleur: Plusieurs facteurs auraient contribué au drame ». *Abitibi Express*, Mardi 16 août 2011, p. 6.
- Roque, N., S. Nadeau et A. Badri. 2014. « Preliminary Ergonomics of a Bolting Machine and a Drill Used in Underground Mining ». In *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. (Munich, Germany, March 12-14 2014).
- Roy, B. 1968. « Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE) ». *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle*, tome 2, n° V1, p. 57-75.
- Roy, B. 1985. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Coll. « Gestion ». Paris : Économica, 423 p.
- Roy, B. 2000. *Un glossaire d'Aide à la Décision en français et anglais*. Groupe de Travail Européen « Aide Multicritère à la Décision », Série 3, n° 1, (printemps), 6 p.
- Ruel, F. 1992. « À propos du constructivisme ». In *Autour de l'idée de science: itinéraires cognitifs d'étudiants et d'étudiantes*, sous la dir. de Laroche, M. et J. Désautels, p. 18-32. Québec/Bruxelles : Presses de l'Université Laval/De Boeck Wesmael.
- Ruff, T., P. Coleman et L. Martini. 2011. « Machine-Related Injuries in the US Mining Industry and Priorities for Safety Research ». *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, vol. 18, n° 1, p. 11-20.
- Saaty, T.L. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York : McGraw-Hill, 287p.
- Saint-Pierre, G., G.C. Gélinas et M. Vallée. 1991. *Les innovations dans le monde minier québécois*. Boucherville : Gaëtan Morin Éditeur, 328 p.
- Sari, M., A.V. Selcuk, C. Karpuz et H.S.B. Duzgun. 2009. « Stochastic Modeling of Accident Risk Associated with an Underground Coal Mine in Turkey ». *Safety Science*, vol. 47, p. 78-87.
- Schumpeter, J.A. 1934. *The Theory of Economic Development*. Cambridge : Harvard University Press, 255 p.

- Selikoff, I.J., E.C. Hammond et H. Seidman. 1979. « Mortality experience of insulation workers in the United States and Canada, 1943-1976 ». *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 330, p. 91-116.
- Sheridan, T. 2002. *Humans and Automation : System Design and Research Issues*. New York : John Wiley, 276 p.
- Smets, M., T. Eger et S. Grenier. 2010. « Whole-body vibration experienced by haulage truck operators in surface mining operations : A comparison of various analysis methods utilized in the prediction of health risks ». *Applied Ergonomics*, vol. 41, p. 763-770.
- Sood, A. et G.J. Tellis. 2005. « Technological evolution and radical innovation ». *Journal of Marketing*, vol. 69, (juillet), p. 152-168.
- St-Amand, M. 1992. *Problématique de la sécurité des humains dans une mine utilisant des véhicules autoguidés; un survol*. Centre canadien d'automatisation et de robotique minière, Montréal, École de Polytechnique, 28 p.
- Statistique Canada. 2002. *L'innovation et l'utilisation de technologies de pointe dans le secteur de l'extraction minière au Canada : Extraction de minéraux métalliques*. N° 88F0006XIF2002013 au catalogue. Gouvernement du Canada. 37 p.
- Statistique Canada. 2009. « Cinq types d'innovations dans le secteur canadien de la fabrication : premiers résultats de l'Enquête sur l'innovation de 2005 ». In *Bulletin de l'analyse en innovation*. En ligne. <<http://www.statcan.gc.ca/pub/88-003-x/2007002/10316-fra.htm>>. Consulté le 13 avril 2011.
- Statistics Canada. 2013. « Business Enterprise Current Intramural Research and Development Expenditures as a Percentage of Performing Research and Development Company Revenues ». In *CANSIM Table 358-0211*. En ligne. <<http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=eng&retrLang=eng&id=3580211&paSer=&pattern=&stByVal=1&p1=1&p2=38&tabMode=dataTable&csid=>>. Consulté le 13 décembre 2013.
- Silverman, D.T., C.M. Samanic, J.H. Lubin, A.E. Blair, P.A. Stewart, R. Vermeulen, J.B. Coble, N. Rothman, P.L. Schleiff, W.D. Travis, R.G. Ziegler, S. Wacholder, M.D. Attfield. 2012. « The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case-Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust ». *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 104, p 1-14.

- Syndicat canadien de la fonction publique (SCFP). 2009. « Jour de deuil – 25e anniversaire ». In *Santé-Sécurité*. En ligne. <<http://scfp.ca/sante-et-securite/Jour-de-deuil--25e-a>>. Consulté le 11 avril 2011.
- Szelag, M. 2010. « Application of the Dominance-based Rough Set Approach to Case-based Reasoning ». En ligne. 25 p. <http://www.cs.put.poznan.pl/mszelag/Software/Cadabra/CBR-DRSA.pdf>. Consulté le 7 avril 2011.
- Thivierge, C. 2007. « Les machines d'extraction sous haute surveillance ». *Le Journal des Belmine*, n° 24, (décembre), p. 8-9.
- Tidd, J., J. Bessant et K. Pavitt. 2006. *Management de l'innovation : intégration du changement technologique, commercial et organisationnel*. Coll. « Business school ». Bruxelles : De Boeck Université, 593 p.
- Tilton, J.E. 2003. « Creating wealth and competitiveness in mining ». *Mining Eng.*, vol. 55, n° 9, p. 15-22.
- Unger, R.L. 1996. « Tips for safer mining equipment: Simple design principles can improve equipment safety in mines ». *Min. Health Safety Update*, vol. 1, n° 2, p. 1-3.
- Upstill, G. et P. Hall. 2006. « Innovation in the minerals industry : Australia in a global context ». *Resources Policy*, vol. 31, p. 137-145.
- Ural, S. et S. Demirkol. 2008. « Evaluation of occupational safety and health in surfaces mines ». *Safety Science*, vol. 46, p. 1016-1024.
- Vallières, M. 1989. *Des mines et des hommes : Histoire de l'industrie minérale québécoise*. Québec : Les Publications du Québec, 439 p.
- Vansnick, J.-C. 2009. « L'approche Macbeth en pratique » In *Séminaire du GERAD*. (8 septembre 2009), 35 pages.
- Wang, C.H., Y.C. Chin et G.H. Tzeng. 2010. « Mining the R&D innovation performance processes for high-tech firms based on rough set theory ». *Technovation*, vol. 30, p. 447-458.
- Whitton, E. 2009. « Le Service du sauvetage minier a 61 ans! ». *Le Journal des Belmine*, n° 28, (décembre), p. 8-9.
- Wilde, G.J.S. 1982. « The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health ». *Risk Analysis*, vol. 2, p. 209-226.

- Wilde, G.J.S. 1988. « Risk homeostasis theory and traffic accidents: Propositions, deductions and discussion of dissension in recent reactions ». *Ergonomics*, vol. 31, p. 441-468.
- Wilde, G.J.S. 1998. « Risk homeostasis theory: an overview ». *Injury prevention: journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention*, vol. 4, n° 2, p. 89-91.
- Woodside, A.G. et E.J. Wilson. 2003. « Case Study Research Methods for Theory Building ». *Journal of Business and Industrial Marketing*, vol. 18, p. 493-508.
- Wu, Y.J. 2010. « Construction of safety performance management system for coal mine enterprises in China ». *Management Science and Engineering*, vol. 4, n° 2, p. 40-50.
- Yin, R.K. 2009. *Case Study Research : Design and Methods*, 2e ed. Thousand Oaks (Californie) : Sage Publications, 219 p.
- Yudelman, D. 2006. New mining technology. *The Northern Miner*, Supplément d'été, 22 p.
- Zaras, K. 1996. « Introduction ». In *Prise de décision multicritère : raison d'être en gestion*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue/Académie économique à Katowice, (Rouyn-Noranda, June 28 1996), p.11-17.
- Zaras, K. 2004. « Rough approximation of a preference relation by a multi-attribute dominance for deterministic, stochastic and fuzzy decision problems ». *European Journal of Operational Research*, vol. 159, n° 1, p. 196–20.

