

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE DE GESTION  
ENVIRONNEMENTALE DYNAMIQUE DES ACTIVITÉS  
MINIÈRES

par

Sèmirath LAGNIKA

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE  
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION  
DU DOTORAT EN GÉNIE  
Ph. D.

MONTREAL, LE 17 AVRIL 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Sèmirath Lagnika, 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Hausler Robert, directeur de la thèse  
Département de génie des systèmes, Station expérimentale des procédés pilotes en  
environnement (STEPPE) à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmene, président du jury  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Georges Lanmafankpotin, membre externe indépendant  
Chaire éco-conseil, Département des sciences fondamentales à l'Université du Québec à  
Chicoutimi

M. Glaus Mathias, membre interne  
Département de génie des systèmes, Station expérimentale des procédés pilotes en  
environnement (STEPPE) à l'École de technologie supérieure

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

LE 06 MARS 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Mes remerciements au Créateur, sans Lequel cette thèse n'aurait pas abouti.

Je les destine aussi à M. Robert Hausler, mon directeur de thèse pour ses enseignements constructifs, sa disponibilité et le privilège qu'il m'a accordé de poursuivre ces recherches. Je remercie également M. Mathias Glaus, pour ses critiques constructives. Et, M. Georges Lanmafankpotin, pour sa contribution.

Je tiens à remercier mon principal mentor feu Dr Bonaventure Guèdègbé; M. Crépin Zevounou, pour l'acuité de son soutien; M. Marc Kanho, pour ses grandes connaissances; M. Mathias Pofagi pour ses orientations; Mme Blanche Olodo, pour son amour; et, M. Moucharafou Lagnika pour son éducation.

Djima, Titilayo, Dagbégnon, de si loin, merci pour votre soutien. Mes hommages à feu Achabi Chakirath Osseni, ma mère, professeure et mathématicienne dévouée. Notre guerrière à l'ombre aujourd'hui. Ta réjouissance physique m'aurait honorée, mais je te célèbre en terminant cette thèse. Arikè, mon soleil, si courageuse et si extraordinaire. Merci d'avoir été ma seule famille ici et mon mobile. Trouves dans ce résultat la force de toujours relever tes défis mêmes les plus énormes, car, être une femme c'est un ensemble de défis dans nos sociétés. Intégration, intégrité, force, éducation, détermination, contrôle de soi, fierté et foi sont des armes indétrônables. Un message à toute femme intègre et objective.



# DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE DE GESTION ENVIRONNEMENTALE DYNAMIQUE DES ACTIVITÉS MINIÈRES

Sèmirath LAGNIKA

## RÉSUMÉ

Les activités industrielles dont les mines influencent les modes de vie par leurs besoins en matériaux de base. L'extraction des matériaux enfouis sous terre se subdivise en quatre phases d'activités : l'exploration, la construction, l'exploitation et la clôture, qui se fragmentent en opérations. Mais, ces opérations font des mines une niche de risques responsables d'enjeux environnementaux à gérer. Ces risques varient selon le type d'opération, la sensibilité des facteurs environnementaux, les interactions entre eux et le cycle de vie. Pour réduire leur occurrence, les normes de gestion environnementale et les législations territoriales imposent l'implantation de systèmes de gestion avant l'installation de toute unité de production, principalement les études d'impact sur l'environnement. Elles consistent à identifier les risques ou leurs sources, à prédéterminer les mesures d'atténuation et établir des plans d'action. Nombreuses sont les investigations menées pour développer de meilleures approches de gestion, mais, malheureusement, les risques dans les mines ont une portée négative difficile à éradiquer.

Toutefois, l'avènement de nouvelles technologies ces dernières décennies a favorisé l'émergence des systèmes dynamiques majoritairement orientés vers l'optimisation des productions. Mais, possédant la propriété novatrice d'une gestion non compartimentée, les principes dynamiques avec à la gestion environnementale renforcent la procédure d'évaluation environnementale. Ils offrent alors un nouvel outil de gestion intégrateur de l'évolution du système, de ses composants et des vecteurs de risques générés. La majorité des facteurs environnementaux étant tributaire de l'eau, source de vulnérabilité connue, les résultats vont se structurer spécifiquement autour. Les contributions se déclinent en trois parties après la recension bibliographique.

La première partie consiste à élaborer des stratégies d'évaluation environnementale et de maintenance du système de production dans son contexte dynamique en intégrant les phases du cycle de vie de  $T_0$  à  $T_{n+p}$ . Plusieurs étapes ont servi à déterminer qualitativement et quantitativement les risques dans le temps et à faire l'évaluation environnementale continue du système une fois la mine en opération. Cette réalisation a permis une caractérisation raffinée à jour des facteurs affectés.

Suite à cela, l'investigation sur les systèmes dynamiques a démontré leurs propriétés compatibles à la gestion environnementale minière. Ceci au niveau de : la prise de décisions, la modélisation opérationnelle, la numérisation de la communication des risques, la planification des mesures d'atténuation et la résolution des risques. Enfin, la troisième partie est un cas pratique qui favorise la validation du potentiel des systèmes dynamiques aux pratiques de gestion environnementale existantes. Un modèle temporel de gestion des risques, dont ceux découlant des effluents, a été produit.

## VIII

Les analyses permettent de montrer un niveau de maturité de ce secteur à intégrer le temps, les aspects rétroactifs et interactifs à la gestion environnementale. Cette nouvelle approche répond ainsi aux besoins du principe d'amélioration continue, à la prise en compte des données dynamiques correspondantes au niveau de développement des mines et favorise ainsi l'arrimage aux normes internationales.

**Mots-clés** : industrie, mines, dynamique, gestion, évaluation environnementale



# **DEVELOPMENT OF A DYNAMIC ENVIRONMENTAL MANAGEMENT APPROACH IN MINING**

Semirath LAGNIKA

## **ABSTRACT**

Industrial activities including mining influence lifestyles by their material needs. The extraction of buried materials is subdivided into four phases: exploration, construction, mining and closure, which are fragmented into operations. However, these operations make mining a niche of risks responsible for environmental issues to manage. These risks vary according to the type of operation, the sensitivity of the environmental factors, the interactions between them and the life cycle. To reduce their occurrence, environmental management standards and territorial legislation require the implementation of management systems before the installation of any production unit, mainly environmental impact studies. They consist of identifying risks or their sources, pre-determining mitigation measures and establishing action plans. There are many investigations to develop better management approaches, but, unfortunately, the risks in this active environment are still negative and difficult to eradicate.

However, the advent of new technologies in recent decades has favoured the emergence of dynamic systems mainly geared towards production optimization. But, possessing the innovative property of a non-compartmentalized management, dynamic systems associated with environmental management offer a new management tool that integrates the evolution of the system, its components and the risks generated. The majority of environmental factors being dependent on water, source of known vulnerability, the results will be structured specifically around. The contributions are divided into three parts after the bibliographic review.

The first part consists in developing optimal strategies for environmental assessment and maintenance of the production system in its dynamic context by integrating the phases of the life cycle from  $T_0$  to  $T_{n+p}$ . Several steps were used to qualitatively and quantitatively determine the risks over time and to conduct a continuous environmental assessment of the system once the mine is in operation. This achievement allowed a refined and up-to-date characterization of the affected factors.

Following this, the investigation on dynamic systems has demonstrated its mine-compatible properties to environmental management. This on the: decision-making, operational modelling, digitization of risk communication, planning of mitigation measures and risk resolution. Finally, the third part is a practical case that promotes the validation of the potential of dynamic systems to an existing environmental management practices. A temporal risk management model, including those derived from effluents, was produced.

The analyses show a level of maturity of this sector to integrate time, retroactive and interactive aspects in environmental management. This new approach meets the needs of the

X

principle of continuous improvement, takes into account dynamic data corresponding to the level of development of the mines and, thus, promotes the link with international standards.

**Keywords** : industry, mining, dynamic, environmental assessment, management

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES .....	5
1.1 Problématique .....	5
1.2 Objectifs de la recherche.....	14
1.3 Hypothèses de recherche.....	15
CHAPITRE 2 ÉTAT GÉNÉRAL DES CONNAISSANCES .....	17
2.1 Enjeux reliés à la problématique.....	20
2.2 Définition des notions utilisées.....	20
2.3 Sommaire du recensement des écrits autour des principaux enjeux.....	28
2.3.1 Risques environnementaux et impacts.....	28
2.3.2 Enjeux de la gestion environnementale (GE) et facteurs environnementaux (FE) liés aux opérations minières .....	29
2.3.3 Ouvrages de rétention (ORs) et gestion des résidus miniers .....	32
2.4 Synthèse de la revue de littérature .....	34
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	39
3.1 Fondements méthodologiques et structure de la démarche proposée.....	39
3.2 Matériel et procédures.....	42
3.2.1 Base de données et cueillette des données .....	42
3.2.1.1 Modélisation .....	42
3.2.1.2 Simulation .....	43
3.2.2 Logiciel de simulation retenu.....	43
3.2.3 Systèmes dynamiques (SD) et logiciel Vensim .....	44
3.2.3.1 Flux .....	44
3.2.3.2 Variables auxiliaires ou constantes.....	44
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : DYNAMIC MATRIX FOR AN ADAPTIVE ENVIRONMENT MANAGEMENT IN MINING: A FEED-ENGINEERING ALTERNATIVE?.....	47
4.1 Introduction and scope of study.....	49
4.2 Research methodology.....	51
4.3 Analysis of results.....	58
4.3.1 Recapitulation of Potential Environmental Risks and Activities in an OPM .	58
4.3.2 Qualitative and quantitative data from matrix of symbol values or numerical matrix .....	59
4.4 Discussion .....	65
4.5 Conclusion .....	67

Acknowledgment .....	68
Appendices.....	68
CHAPITRE 5 ARTICLE 2 : MODELING OR DYNAMIC SIMULATION: A TOOL FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN MINING? .....	69
5.1 Introduction.....	70
5.2 Research methodology.....	73
5.3 Mining industry and ERs .....	74
5.4 Introduction to dynamic systems and simulation.....	78
5.5 Results.....	80
5.6 Discussion and future direction .....	87
5.7 Conclusion .....	90
Disclosure statement .....	92
CHAPITRE 6 Article 3 : ENVIRONMENTAL RISKS IN OPEN PIT MINES: REPRESENTATION OF A TEMPORAL EVOLUTION RELATED TO WATER FACTOR.....	93
6.1 Introduction and Scope of Study.....	94
6.2 Research Methodology .....	95
6.3 Results.....	101
6.4 Discussion .....	107
6.5 Conclusion .....	109
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE .....	111
7.1 Enjeux environnementaux en lien avec le facteur hydrique .....	111
7.2 Évolution des risques environnementaux dans une MCO .....	113
7.3 L'évaluation environnementale continue (ÉEC) .....	114
7.4 Retombées scientifiques et industrielles de la thèse .....	121
7.5 Perspectives.....	123
CONCLUSION.....	125
ANNEXE I STRUCTURE DES PARAMÈTRES ET FE CONSIDÉRÉS .....	127
ANNEXE II PRÉSENTATION ORALE À L'ACFAS.....	129
ANNEXE III L'EAU, ENJEU ENVIRONNEMENTAL MULTIDIMENSIONNEL .....	131
ANNEXE IV TABLEAUX DE L'ARTICLE 1 .....	137
ANNEXE V APPENDICES A, B1, B2, C1, C2 ET D DE L'ARTICLE 1.....	143
APPENDICE D.....	151
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	153

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Récapitulatif des variables de l'eau d'après Abdel-Dayem (2011).....	12
Tableau 1.2 Récapitulatif général du cycle de vie des MCO .....	13
Tableau 2.1 Récapitulatif des risques environnementaux (RE) miniers .....	30
Tableau 2.2 Synthèse de la revue de littérature sur la gestion environnementale minière (GEM) et les SD .....	36
Tableau 4.1 Summary of the EIA or public hearing reports studied.....	53
Tableau 4.2 Summary of activities or mining operations in an OPM .....	55
Tableau 4.3 Summary table of the determination of the significance value of an environmental impact .....	57
Tableau 4.4 Qualitative data results on an open-pit mine (OPM) project.....	59
Tableau 4.5 Qualitative data results on post-EIA of an OPM .....	60
Tableau 4.6 Environmental mining assessment scores on the project phase .....	61
Tableau 4.7 Summary of magnitude and significance of negative risks .....	62
Tableau 4.8 Environmental factors parameters in order taken into account in the sensitivity analysis .....	63
Tableau 5.1 Keywords used for information research and related objectives.....	72
Tableau 5.2 Summary of environmental factors related to mines and recognized in gray literature.....	77
Tableau 5.3 Environmental challenges and issues covered by selected authors .....	80
Tableau 5.4 Simulation software used in the mining industry from 1961 to 2005 .....	84
Tableau 5.5 Summary of DS research areas covered in the literature.....	86
Tableau 6.1 Observations pairs with the corresponding variables .....	105
Tableau 6.2 Paired T-test results with the corresponding variables.....	106



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Structure évolutive de la production minière et de quelques impacts environnementaux générés .....	9
Figure 1.2 Interactions entre l'eau et roches, tirée .....	11
Figure 2.1 Enjeux relevés autour de la thèse dans la littérature scientifique.....	20
Figure 2.7 Facteurs environnementaux (FE) reliés aux opérations minières .....	29
Figure 2.8 Liaisons, influences et interactions entre les FE dans le système d'une MCO..	30
Figure 2.10 Cycle de gestion environnementale minière adapté au cycle de Deming, à ISO 14001 et aux résultats de Gendron (2004) .....	34
Figure 2.11 Illustration comparative entre les outils de gestion.....	35
Figure 3.1 Démarche méthodologique de recherche proposée pour les travaux réalisés....	41
Figure 3.4 Représentation d'une variable auxiliaire.....	45
Figure 3.5 Variables auxiliaires avec canaux d'informations positif (a) et négatif (b) .....	45
Figure 3.6 Boucles à polarité positives (a) et négatives (b) .....	46
Figure 4.1 EIA regulation respecting Canada and Quebec laws. ....	50
Figure 4.2 Description of the work methodology .....	53
Figure 4.3 Plotted results of comparison importance level between.....	63
Figure 4.4 Sensitivity analysis: magnitude and significance risks evolution from project to operation phase depending on environmental factors .....	64
Figure 5.1 Literature review structure in the completion of article.....	73
Figure 5.2 Extraction process model of an ore in its environment.....	79
Figure 5.3 Single-sequence modeling of ore production.....	80
Figure 5.4 Research area history on dynamic simulation for the mining industry.....	85
Figure 6.1 Risk assessment by prioritization.....	98

Figure 6.2 Conceptual representation of elements of ecosystem's factors depending on water .....	102
Figure 6.3 Areas use of water in the OP mining process .....	103
Figure 6.4 Identification and risk characterization related to water through HAZID method 103	
Figure 6.5 Graphical clouds of few environmental risks related.....	104
Figure 6.6 Evolution of the linear regression line over time .....	105
Figure 7.1 Schématisation sommaire des risques environnementaux reliés aux ressources hydriques et aux ouvrages de rétention dans une MCO en cours de production.....	112
Figure 7.2 Cartographie temporelle et sommaire de quelques risques environnementaux encourus dans les MCO .....	113
Figure 7.3 Diagramme de boucle de causalité de la GEM autour de l'eau .....	118
Figure 7.4 Vision systémique de la proposition de recherche sur la GEM dans une mine	119



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ABE : Agence béninoise pour l'environnement

ACV : Analyse du cycle de vie

CE : Comptabilité environnementale

CER : Comité d'éthique de la recherche

DBC : Diagramme(s) de boucle(s) causale(s) ou de causalité

DGM : Direction générale des Mines

ÉEC : Évaluation environnementale continue

EES : Évaluation environnementale stratégique

EIE : Étude d'impact sur l'environnement

ÉTS : École de technologie supérieure

FE : Facteur(s) environnemental(aux) ou de l'environnement

FR : Facteur(s) de risques

GE : Gestion environnementale

GEM : Gestion environnementale minière

GES : Gaz à effet de serre

Kg : Kilogramme(s)

Km<sup>2</sup> : Kilomètre(s) carré(s)

## XVIII

m<sup>3</sup> : Mètre(s) cube

MCO : Mine(s) à ciel ouvert

MS : Mine souterraine

Ni 43 101 : National instrument 43-101

OP : Open-pit mine

PGE : Plan de gestion environnemental

RE : Risque(s) environnemental(aux)

RLS : Régression linéaire simple

RTE : Rapports techniques environnementaux

SiD : Simulation dynamique

SD : Système(s) dynamique(s)

SGE : Système de gestion environnementale

SIG : Système d'Information Géographique

SPS: Symbolic programming system language

STEPPE : Station Expérimentale des Procédés Pilotes en Environnement

T : Tonne(s)

TI : Technologies de l'information

## NOMENCLATURE MATHÉMATIQUE

$\varepsilon$  : Terme d'erreur aléatoire, non observé, indépendant et distribué identiquement

$\varepsilon_i$  : Variable d'espérance nulle ou négligeable ( $\varepsilon_i \approx 0$ )

$\mathcal{Y}$  : Variable expliquée aléatoire ou dépendante

$\mathcal{X}$  : Variable indépendante ou explicative

$\beta_0$  : Intersection en ordonnée ou  $\beta_0 \dots \beta_n$  constantes

$\beta$  : Pente

P : Production

$\mathcal{R}_i$  : Résultat conjoint

T : Temps

$T_0$  : Temps initial

$T_{n+p}$  : Temps supérieur ou au-delà du temps initial

$t$  : Exploration, construction et installation

$t_2$  : Exploitation

$t_3$  : Fermeture (19 à 25 ans)

$H_0$  : Hypothèse nulle

$H_1$  : Hypothèse alternative



## INTRODUCTION

L'accroissement des activités industrielles et les percées fulgurantes en technologies ces derniers siècles ont révolutionné bien de modes de vie (Freeman & Louçã, 2001; Kasa, 2009; Sterman, 2000). Cet état des choses a influencé par leurs besoins, bien de secteurs d'activités économiques. Nombre d'entre eux par leur utilisation des ressources naturelles ont suscité l'explosion partout dans le monde d'entreprises dans le domaine de la construction et des mines (Godrej & Forbes, 2012). Sachant qu'il existe deux (2) grandes pratiques d'extraction dans le monde (Lintukangasa, Suihkonena, Salomäkia, & Selonen, 2012), cette thèse va se limiter aux mines à ciel ouvert (MCO).

Un regard sur une telle mine dans son système d'implantation montre un système chargé d'interactions multiples entre les facteurs environnementaux et opérationnels organisés dans le but d'extraire les matières désirées. Dans ce type de système, chaque élément subit plus d'une influence (Halatchev & Dimitrakopoulos, 2003). Des phénomènes s'y produisent, s'y développent comme les situations à risque, illustrant une complexité due aux multiples interactions, et un dynamisme autour de l'interdépendance des éléments.

La notion d'évaluation environnementale et de gestion environnementale a plus de 50 années de progrès. Depuis les réflexions sur la limite de la croissance, le rapport Meadows en 1960 et l'alarme de Carson (1962) la conscientisation aux impacts sur l'environnement a été encouragée. Ainsi, la conception de la plupart des lois ou réglementations en environnement et l'émergence de commissions se sont multipliés après Stockholm (1972) ce qui va conduire au rapport Brundtland en 1987 puis sur la notion du développement durable (Perron, 2009; Québec, 2017; Tamba Takam, 2017). Ces mécanismes successifs ont favorisé la conférence de Rio en 1992 puis à l'intégration des procédures de gestion environnementale dans les pratiques devenues obligatoires. Toutefois, l'importance des enjeux environnementaux en évidence, continue de motiver plusieurs pays à signer des accords après le Protocole de Kyoto en 1997 aux conférences de : Copenhague (2009), Paris (COP21, 2015), et Marrakech (COP22, 2016) (Tamba Takam, 2017). Alors, la mise en place des procédures, systèmes, normes et lois en environnement a pris forme de ces prises de conscience dès les années 1960. Une succession de mouvements et de rendez-vous qui a évolué exigeant l'application des normes, des lois et des politiques dans la plupart des régions du monde afin de faire

l'équilibre entre la rentabilité économique, le progrès social et les besoins écologiques (Labonne, 1999; Zeng, Tam, & Tam, 2010). Les travaux de Morteza et Mahdi (2014), de Pokhrel et Dubey (2013) et de Prikryl et al. (1999) sur les impacts dans les mines, exposent les situations à risques importantes développées dans ce secteur et un besoin de gestion de celles-ci. Les impacts environnementaux découlant des opérations minières sont diversifiés et générés à chacune des phases de leur développement (Bhatasara, 2013; M. S. Lagnika, 2004; Panov, Ristova, & Stefanovska, 2011). Bien que leur *durabilité* reste critiquée, les mines se doivent d'équilibrer les facteurs d'influence (FI) relatifs aux trois (3) aspects cités dans le but d'atteindre un certain équilibre avec l'environnement. Ainsi, la gestion environnementale (GE) est devenue un enjeu majeur pour les industries à laquelle la communauté scientifique s'évertue à concevoir des outils appropriés. Des systèmes de gestion des risques environnementaux se sont multipliés depuis 1978 et se spécialisent au niveau : 1) de la législation grâce aux normes; 2) des études d'impacts sur l'environnement (ÉIE) avec l'identification des facteurs environnementaux (FE); 3) de l'économie grâce à l'empreinte environnementale, au recyclage et à la banque de carbone ; et 4) des équipements à la fine pointe de la technologie utilisée. Mais, outre le fait qu'ils permettent de réduire l'impact des productions, d'éliminer certains impacts comme le traitement des eaux résiduelles ou des déchets, elles n'apportent pas de solutions globales, interactives, et ni durables. Pourtant la réduction voire l'élimination des risques environnementaux nécessite l'intégration de divers paramètres affectés : les facteurs de l'environnement (FE), les législations en vigueur, l'évolution des phénomènes, l'économie, les technologies et le mode de gouvernance. Un mode de gestion qui requiert selon Gendron (2004) le développement et la mise en opération d'outils adaptés. Et c'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de thèse.

Les systèmes dynamiques sont un mode de gestion interdisciplinaire de systèmes complexes où les liaisons interactives sont multiples, s'associent à la simulation dynamique et des calculs mathématiques (Serman, 2000). La simulation dynamique (SiD) quant à elle, est un outil qui va au-delà de la représentation graphique pour l'optimisation des productions malgré la complexité des interactions sur la base d'interfaces numériques. Elle est connue du secteur des mines. En effet J. R. Sturgul (2001) affirme qu'elle est une des techniques les plus utilisées en science de la gestion, et sa première utilisation date de 1961 par Rist dans le

secteur minier. Depuis, les techniques de simulation dynamique ont évolué et se sont étendues à bien d'autres problématiques à résoudre grâce à la puissance des logiciels de calcul développés (Fuchs, 2006; Widmark, 2012). Comment sont-elles appliquées aujourd'hui dans les mines? Peuvent-elles contribuer à la gestion environnementale? La revue de littérature réalisée sur les systèmes dynamiques et les approches de gestion des risques dans les mines a mis en relief divers champs d'action de ce principe dans la gestion de certains paramètres miniers. La plupart sont axées sur : 1) l'optimisation de la production (Dimitrakopoulos & Ramazan, 2008; Osanloo, Gholamnejada, & Karimi, 2008; Ramazan & Dimitrakopoulos, 2007); 2) l'optimisation par des représentations géométriques dynamiques (Askari-Nasab, Frimpong, & Szymanski, 2007; Duncan & Rahman, 2013; Huang & Espley, 2005; Xiao-ping, Yu-hong, & Ya-nan, 2015); 3) l'aide à la décision et la gestion des risques (Araz, 2013; Huang & Espley, 2005; Li, Song, & Li, 2013; Mirchi, Madani, Watkins Jr., & Ahmad, 2012); et, 4) la modélisation dynamique intégrant des analyses économiques (Ghoddusi, 2010; Montiel & Dimitrakopoulos, 2015; Turner, 1999).

Mais, une publication de C. H. Yu, Chen, Lin, et Liaw (2003) vient exposer quelques potentialités de l'application des systèmes dynamiques aux principes du développement durable. Ils se sont servis d'un logiciel de simulation pour réaliser leur modèle dynamique sur l'utilisation durable des ressources terrestres. Ainsi, au terme de leur travail, après avoir identifié les interactions possibles, et déterminé les indicateurs d'aide à la prise de décision, cette simulation a permis de trouver les composants pertinents à la gestion durable des ressources exploitées. La simulation dynamique favoriserait donc : la mise en évidence des paramètres dynamiques d'un secteur d'activité, l'analyse approfondie des facteurs influents, des liens interactifs ou rétroactifs, et peut favoriser une meilleure approche de gestion des risques. En orientant les réflexions sur l'intégration des théories des systèmes dynamiques (SD) dans les procédures d'évaluation environnementale, cette thèse vise ainsi l'amélioration de la procédure de gestion environnementale minière.

Les recherches sur la simulation du fonctionnement dynamique général d'une mine à ciel ouvert (MCO) se sont révélées non fructueuses, mais les travaux de Bouloiz, Garbolino, et Tkouat (2013) montrent l'aperçu d'une autre organisation dans son système. Les avantages de cette simulation dynamique sont nombreux. Elle facilite : 1) l'aide à la prise de décision;

2) l'analyse de la complexité des facteurs influents avec les interactions; 3) la révélation des variables incertaines ou non précises; 4) le suivi du comportement des éléments du système; et, 5) l'implantation de meilleures pratiques de gestion. Pourtant, dans la perspective de renforcement des principes de protection de l'environnement et des législations, les mines se doivent de favoriser l'observation constante des aspects environnementaux, sociaux et économiques de sorte qu'elles génèrent de moins en moins de risques. La revue de littérature va révéler plutard l'absence de modèles dynamiques sur la gestion environnementale des mines. Elle montre aussi d'autres lacunes au niveau de la prédiction des risques dans ce secteur, car la majorité est déterminée à la phase du projet et subie une fois la mine en opération. La présente recherche va donc permettre de situer le niveau d'usage des principes des systèmes dynamiques dans l'extraction minière. Puis, elle va servir de plateforme d'analyse des facteurs responsables de quelques risques environnementaux et d'évaluation du potentiel de l'association ce principe à la gestion environnementale. Le défi ultime sera d'élaborer un modèle de caractérisation et d'analyse environnementale des risques sur la base du principe des systèmes dynamiques.

La structure du présent document se décompose en six (6) chapitres. Après cette introduction, le chapitre 1 décrit le problème étudié ainsi que les hypothèses et les objectifs de cette recherche. Le chapitre 2 suivant vient récapituler l'état des connaissances autour de la problématique étudiée pour aborder la démarche méthodologique générale au chapitre 3. Ce troisième chapitre montre le cheminement utilisé pour atteindre les objectifs depuis les fondements de la validation des hypothèses par des procédures ou méthodes de mesure précise. Cette méthodologie générale est un regroupement des démarches individuelles exploitées à chaque contribution. Du chapitre 4 au chapitre 6 sont reportées toutes les contributions sous la forme de résultats. Ces publications soumises aux comités de lecture scientifiques forment la substance de ces travaux, car l'atteinte de l'objectif de recherche s'est faite progressivement à travers ces étapes. Puis, une discussion générale présentée au chapitre 7 est finalement suivie de la conclusion et de recommandations sommaires au chapitre 8.



## CHAPITRE 1

### PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Cette partie présente la problématique, les questions de recherche et les hypothèses retenues. Elle se termine par une brève description des objectifs poursuivis.

#### 1.1 Problématique

La structure des opérations minières à ciel ouvert est constituée de plusieurs unités d'opérations sommairement définies à la Figure 1.1. La ligne en gras désigne le flux des rapports entre l'offre (le gisement disponible) et la demande (clientèle) qui achète le produit fini. La ligne «*en trait double*» indique le circuit traditionnel d'une production minière composée de différentes opérations. Et, les lignes en pointillés indiquent le flux de quelques risques environnementaux (RE) connus découlant de ces opérations. Les RE reliés à l'exploitation minière dans la Figure 1.1 sont également représentés sommairement pour les besoins de cette section du document, mais la littérature en révèle un volume considérable qui va être détaillé. Malheureusement, ce sont des impacts qui subsistent malgré les techniques de maîtrise ou de contrôle de l'environnement élaborés.

La gestion environnementale (GE) est une procédure par laquelle les organisations dans le contexte actuel où la question environnementale est une préoccupation majeure, peuvent contrôler, réduire, voire éliminer les impacts environnementaux de leurs activités. Ceci, tout en intégrant selon Gendron (2006) les nouveaux paramètres écologiques et les nouvelles fonctions managériales aux traditionnelles. La gestion environnementale repose donc sur la mise en place des responsabilités, des procédures intégrées de gestion et la mise en œuvre des processus ou moyens nécessaires de politiques environnementales par l'organisation. Les outils en gestion environnementale sont nombreux et se sont multipliés ces dernières décennies sans pour autant résoudre ces risques (Evangelinos, Allan, Jones, & Nikolaou, 2014; MacKinnon, Duinker, & Walker, 2018). Parmi les outils existants et en termes de

volume d'usage, l'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) est plus utilisée à cause des obligations légales et gouvernementales (Ashofteh, Bozorg-Haddad, & Loáiciga, 2017; Bouvier, 2006; Ogola, 2007). Elle a prouvé son efficacité par le contrôle ou une certaine maîtrise risques environnementaux par les organisations, dont les mines.

Ainsi, depuis l'exploration à la clôture, la gestion environnementale minière (GEM) passant par une série de consultations et d'analyses par audience publique et une étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) est produite pour aboutir à un ensemble de décisions. Des décisions qui vont se traduire en recommandations, mesures d'atténuation et en programmes de suivi ou de surveillance. Mais, dans ce contexte des opérations d'extraction, la procédure de gestion environnementale paraît se baser sur une identification des risques avec des paramètres invariables alors que l'état de la mine n'est plus le même au cours du temps. Ce qui peut rendre moins efficace le processus de gestion environnementale dans ce système plutôt dynamique, car le projet ayant débuté à  $T_0$  il se poursuit au-delà de  $T_{n+p}$  avec des opérations variées. L'ÉIE se produisant quant à elle au stade de projet, les décisions prises sur cette base ne correspondent plus une fois le projet mis en opération. De la même manière, les risques associés à ces opérations peuvent apparaître de différentes manières et subir des changements en fonction de la phase du développement atteint.

Pourtant, un autre principe de gestion comme celui des systèmes dynamiques a été utilisé avec succès dans certains aspects de la gestion opérationnelle des mines et d'autres domaines d'activités. Rarrbo (2010) cite les domaines : de la gestion de la production, du marketing, d'évaluation des risques, du design des fosses, de la modélisation des opérations, d'aide à la décision sur des conditions multicritères, de la finance, des relations humaines, des enjeux de transport et de l'environnement. Effectivement dans tous les domaines où le temps est une variable importante, Rarrbo (2010) affirme qu'ils servent d'instruments d'analyse ou d'aide à la décision.

### ***Systèmes dynamiques, outils de simulation et implications concrètes***

Les systèmes dynamiques et quelques outils de simulation existent depuis les années 1948 grâce au mathématicien Robert Wiener qui a mis au point la théorie ou du contrôle de la *cybernétique* portant sur la mise au point de mécanismes de contrôle automatique pour des

procédés militaires. Donella H. Meadow en 1972 selon Senge (1990) a enrichi leur champ d'application grâce à sa théorie sur la limite de croissance permettant de discuter de l'impact de la croissance démographique, de la pollution et de l'utilisation des ressources sur la planète. Toutefois, ils avaient fait leur apparition dans les mines en 1961 suite aux travaux de Rist sur la première simulation minière sous terre digitale avec le logiciel SPS (*Symbolic programming system language*). Konyukh , Galiyev, et Li (1999) ont prédit l'attachement des mines aux outils visuels de simulation trouvant qu'ils correspondent mieux au domaine d'activité. Ils connaissent ainsi une expansion progressivement renforcée favorisant de nouvelles opportunités d'innovations et d'améliorations opérationnelles. Il s'en est suivi une prolifération de logiciels (outils de simulation) dont les détails sont rapportés dans les résultats au chapitre 4, mais il est important de mentionner qu'ils se rapportent majoritairement à la gestion ou à l'optimisation de la production minière. Ingvaldsen et Gulla (2012) rajoutent qu'en plus d'être considérés encore comme une technologie émergente, les systèmes dynamiques complètent l'environnement traditionnel du «*commerce (business) intelligent*» et de surveillance des processus, des qualités recherchées en gestion environnementale. En effet, deux (2) champs d'application distincts sur l'optimisation de la production et par la représentation géométrique dynamique ont les meilleurs pourcentages d'utilisation. Mais ils ne réduisent pas pour autant les risques reliés. La revue de littérature montre que presque aucune recherche n'aborde les systèmes dynamiques dans le but simple de décrire la chaîne de production ou d'analyser le processus de gestion environnementale implanté ou à implanter en dehors d'une étude de Halatchev et Dimitrakopoulos (2003) pas si récente. Pourtant, ces simulations servent à faire : 1) des analyses de sensibilité, 2) étudier la variabilité des facteurs composant le système, 3) connaître les relations influentes, 4) les interactions, 5) les approches possibles de contrôle ou de gestion et 6) évaluer préalablement les mesures de gestion. D'ailleurs en dehors de l'industrie minière, les systèmes dynamiques sont utilisés pour de nombreux autres objectifs complexes dont les analyses de stratégie les prises de décisions, la gestion pandémique, la modélisation d'entreprises, l'étude des systèmes socio-économiques, etc. (Araz, 2013; Askari-Nasab et al., 2007; Bouloiz et al., 2013; Fuchs, 2006; Hines et al., 2011; Rarrbo, 2010; Wu, Xie, Hua, Shi, & Olson, 2010). Dans les mines, le recensement des écrits réalisé cite la rentabilité financière, la planification

optimisée, l'aide multicritère aux décisions, le *design* des fosses et la planification minière comme les champs d'application de ce principe. Les systèmes dynamiques sont des pratiques de gestion certes efficaces, mais auxquelles, la gestion environnementale est peu associée. L'intégration des systèmes dynamiques aux outils de gestion environnementale des risques encourus dans les mines est quasi inexistante dans la littérature. Pourtant, ils peuvent servir d'appui systémique à court, moyen ou long terme intégrant cette notion d'évolution du risque toujours dans le sens d'une amélioration continue.

Par exemple, une publication de C. H. Yu et al. (2003) soit 2% de la revue de littérature réalisée parle de l'intégration des systèmes dynamiques pour une gestion durable des activités extractives par rapport à la vérification des facteurs environnementaux (l'air, l'eau, sol et le niveau de durabilité). Ceci démontre que les systèmes dynamiques en environnement restent un champ de réflexions à approfondir pour l'industrie minière. Rarrbo (2010) a d'ailleurs insisté sur le fait que la dynamique des systèmes approfondit l'aspect explicatif, rétroactif, *autorégulateur* et oscillatoire en plus de l'aspect descriptif du système étudié, permettant ainsi d'expérimenter divers scénarios. Il serait pertinent d'une part d'utiliser ce potentiel et de l'appliquer aux mines pour de meilleures approches de gestion des risques. Ceci dans le but non seulement d'enrichir une bibliographie scientifique obsolète, d'exposer certaines insuffisances de la gestion environnementale et encourager la résolution des risques en associant les principes des systèmes dynamiques.

Le problème est donc de savoir si la gestion environnementale minière telle qu'exploitée actuellement repose sur des données correspondantes au développement de la mine après l'état de projet. Ainsi, l'idée d'intégrer une représentativité temporelle, qualitative et quantitative des risques selon les facteurs environnementaux, fidèle au développement minier par le biais des systèmes dynamiques peut servir à réduire les impacts ou leurs interactions.

Avec la complexité des informations disponibles, une démarche progressive s'est imposée à la réalisation de ces études. Le choix d'un facteur de l'environnement parmi les neuf (9) reliés aux activités extractives s'avère alors déterminant. Il s'est porté sur l'un des facteurs les plus sensibles et dont les autres facteurs sont tributaires selon Stumm , Gherini , et

Forsberg (2006), afin de révéler les considérations imbriquées, les liens, les interactions, les rétroactions possibles et responsables des risques encourus.

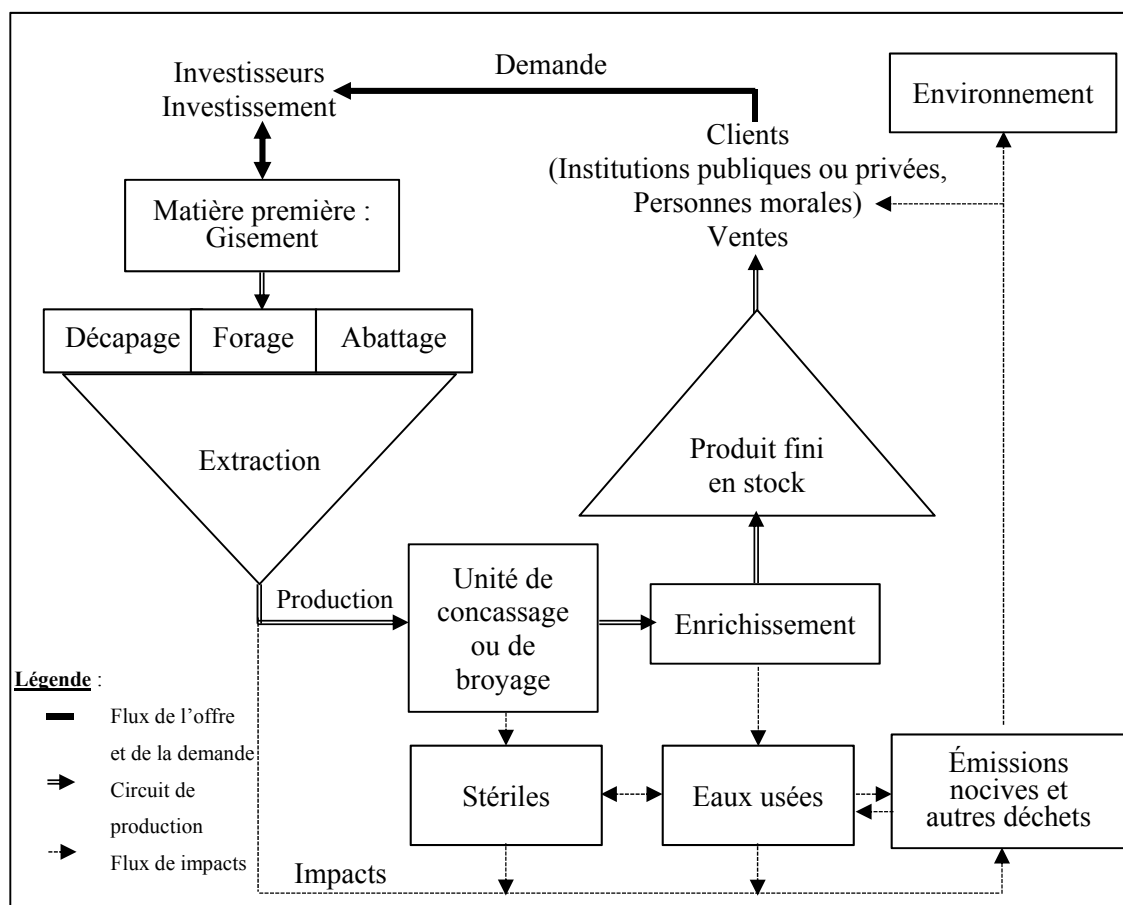


Figure 1.1 Structure évolutive de la production minière et de quelques impacts environnementaux générés

Il s'agit de l'eau. Statistique Canada (2012) révèle que les minières ont une consommation de 497.2 millions de m<sup>3</sup> et 620.4 millions m<sup>3</sup> d'eaux usées sont drainées. En 2005 aux É.-U., Soni et Wolkersdorfer (2016) révèlent que 15,2 millions m<sup>3</sup> en surface et sous terre sont quotidiennement utilisées par les mines. Elle est donc indispensable aux activités industrielles et aux opérations minières. De plus, l'eau possède cette propriété de s'infiltrer à tous les spectres des facteurs environnementaux lui sont reliés (Skousen & Vance, 2003; Stumm et al., 2006; Tanner & Hughes, 2015).

### ***Importance et paramètres principaux de l'eau***

Ce facteur dont l'enjeu est mondialement connu est considéré comme l'essence de la vie sur terre par les organisations internationales (UNICEF, OMS, etc.) et de nombreux scientifiques tels que St-Hilaire, Duchesne, et Rousseau (2015). C'est une ressource à la fois sensible, essentielle à la vie de la majorité des organismes vivants. L'eau suscite de nombreuses investigations en ce qui concerne sa préservation avec les augmentations de pénurie en eau dues à sa répartition inégale, l'usage par la population humaine et les besoins économiques croissants, confirmés par Pittock et Lankford (2010). En effet, Majumder (2015) expose le fait que dans certains pays industrialisés, la consommation de l'eau des industries est plus que celle des populations. D'ailleurs, Statistiques Canada (2012) estime l'utilisation de l'eau dans l'industrie minière à des centaines de millions de mètres cubes ( $m^3$ ) et les eaux usées drainées à plus de 600 millions de  $m^3$ . Ce qui représente une consommation considérable. Il faut noter que les cours d'eau sont aussi des réceptacles naturels pour les écoulements en provenance du sol, du sous-sol et des contaminants.

### ***Qualité de l'eau et interactions***

Avec des programmes de suivi de la qualité de l'eau, Abdel-Dayem (2011) a déterminé les caractéristiques communes de qualité d'eau. Les plus communes sont : la température, le pH, la turbidité, les concentrations en éléments nutritifs (P, nitrates,  $NH_4$ ,  $NO_3$ ,  $NO_2$ , etc.), les coliformes fécaux (CF), le total de sel dissous (TSD), le total en oxygène dissous (TOD), la demande en oxygène biologique (DOB). Il faut noter que ces caractéristiques sont des variables sensibles sur les plans physiques, biologiques, bactériologiques, en éléments nutritifs, en métaux lourds et en salinité (Abdel-Dayem, 2011). La qualité de l'eau reste vulnérable, car elle se dégrade face à toute forme de pollution. Depuis 1974, l'OMS selon (EC, 2004) exigeait des propriétés physiques saines. L'eau doit être incolore, sans odeur, sans agents pathogènes, non salée, sans turbidité, contrôlée et avoir un pH neutre. Pour prévenir les contaminations, il faut contrôler les facteurs de risques, préserver les paramètres de qualité, comprendre le cycle et contrôler les interactions de ce système. Huisman et Wood (1974) donnent un aperçu des interactions *écohydrologiques* et la décrivent comme une matrice représentée à la fois par une topographie, une géomorphologie avec une composition

minérale dont certaines caractéristiques de perméabilités. À cette matrice s'ajoutent les actions climatiques, l'usage des terres qui vont influencer les débits d'eau en surface et sous terre, dont les effets sur les facteurs hydrochimiques sont remarquables. Stumm et al. (2006) renchérit cet aperçu à la figure 1.2. Ils expliquent aussi l'absence de frontières au niveau des pollutions ou des contaminations qu'ils qualifient de pollutions diffuses, car les impacts partent d'un seul facteur de risque à plusieurs facteurs environnementaux ou de risques pour devenir différents impacts. Par exemple, le transport aérien de contaminants suivi du dépôt des particules nocives, conduit à l'acidification des sols puis des eaux, la mauvaise qualité de l'eau pour la consommation, aux dépenses pour les traitements, des problèmes de santé, etc. Ces contaminations affectent la chimie, la biologie du milieu, sa faune et sa viabilité également selon Naidu et al. (2003). L'eau se comporte alors comme une source diffuse de contaminants. On considère aussi : les déversements, le débit, le nombre de drains, la géologie, la sensibilité du milieu, le régime hydrologique, la topographie et la chimie des dépôts. Dans leurs travaux Stumm et al. (2006) révèlent l'incidence de la propriété diffuse de l'eau dans l'écosystème et la menace de sa qualité, ce qui justifie la pertinence de ce travail.

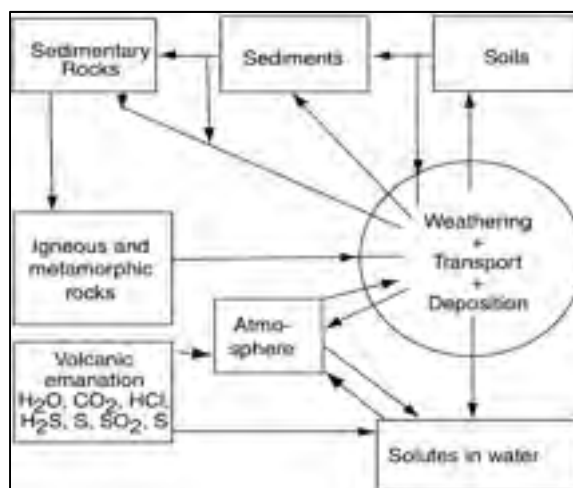


Figure 1.2 Interactions entre l'eau et les roches, tirée de Stumm et al. (2006)

À cela, Naidu et al. (2003) indiquent clairement qu'un mode de prévention serait de trouver et de contrôler la source de pollution impliquant ainsi le maintien de bonnes pratiques d'exploitation et de gestion. Dans le contexte de cette thèse, cette réflexion s'accorde bien, car il y a un besoin de mieux contrôler ou maîtriser la faculté diffuse de l'eau et des autres facteurs dépendant d'elle. Pour ce faire, l'étude du cycle de vie des mines permet d'identifier les points d'entrée ou d'écoulement des eaux et les sources de risques reliés.

Tableau 1.1 Récapitulatif des variables de l'eau d'après Abdel-Dayem (2011)

<b>Variables</b>	<b>Composants</b>
Physiques	Turbidité, pH, solides en suspension et volatiles, température
Biologiques	TOD, DOB
Bactériologiques	CF et autres coliformes
Éléments nutritifs	P, nitrates, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Métaux lourds	Fe, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Hg, etc.
Salinité	Conductivité électrique, TSD, ions solubles Particulièrement pour les eaux souterraines l'analyse de la présence de cations (K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> ) et anions (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )

Dans le cas des mines, il y a différentes manifestations des impacts subis par l'eau. Les contaminants et la réaction des matériaux du sous-sol (exposés à la lumière et l'air) peuvent modifier les caractéristiques des eaux au risque (Hall, 2013; Hattingh & Claassen, 2008; McCullough, 2008). Le processus d'enrichissement qui a pour objectif d'obtenir une forte concentration de ces métaux (Bonzongo et al., 2002; Mballo, 2012) émet également des particules chimiques qui modifient les caractéristiques des eaux. L'ensemble des opérations minières fait varier les paramètres internes des ressources hydriques de sorte à les transformer, puis à générer des impacts et les rendre impropres à la consommation. Ces impacts ont des portées qui pourraient influencer d'une part la composition chimique des eaux, les organismes vivants et menacer leur existence d'autre part.



### ***Le cycle de vie des mines à ciel ouvert (MCO)***

La conception des MCO est une vieille méthode, base des autres formes possibles de mines. Il y a environ 16.6 billions tonnes (T) de minerais qui sont produites dans le monde dont 69% proviennent d'elles. Les grandes phases sont :  $p_1$  = exploration, construction et installation,  $p_2$  = développement, exploitation et reconstruction (s'il y a lieu) puis  $p_3$  = fermeture, restauration du site. Le tableau 1.2 montre un récapitulatif du cycle de vie des MCO. Seulement, dans les publications parcourues, l'objectif des chercheurs la plupart du temps est de citer les risques découlant des activités par des méthodologies connues. Le mode d'apparition et d'évolution ou de développement des risques dans les mines est peu défini dans la littérature. Pourtant, l'illustration imagée des conséquences écologiques négatives pourrait dans un premier temps mieux faire comprendre l'urgence de leur maîtrise et de mieux en apercevoir les causes. La représentation dynamique peut offrir cette vision globale.

Le problème identifié est que l'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) permet de déterminer les risques potentiels et réels, mais les mesures ne s'alignent pas sur l'évolution temporelle du comportement des risques environnementaux potentiels. La procédure de gestion environnementale par ailleurs, ne reflète pas les valeurs effectives de la mine et les décisions se basent sur une identification statique des risques toute sa durée de vie. La procédure ne correspond donc pas au contexte dynamique décrit à la figure 1.1 de la mine de la phase de projet à la mise en opération.

Alors, la question qui se pose est de savoir si la gestion environnementale minière se base sur des données correspondantes aux différents états de la mine au cours de son cycle de vie ? Pour y répondre, trois (3) objectifs sont formulés.

Tableau 1.2 Récapitulatif général du cycle de vie des MCO

<b>Phases principales</b>	<b>Composition des phases</b>	<b>Détails</b>
<b>Projet minier (Début)</b>	<i>Exploration</i>	Recherche du minerai Forages et prélèvement d'échantillons pour analyses Installations temporaires

Tableau 1.2 Récapitulatif général du cycle de vie des MCO (suite)

<b>Phases principales</b>	<b>Composition des phases</b>	<b>Détails</b>
<b>Projet minier (Début)</b>	<i>Construction Installation</i>	Obtention du titre minier et du certificat environnemental Décapage et mise à nu de la terre Connexion au réseau de drainage Construction et érection des infrastructures Construction du système électrique, des établissements et des routes, des ouvrages de rétention (ORs)
<b>Extraction (Mine)</b>	<i>Développement</i>	Identification des points d'extraction Décapage du stérile Ouverture des tranchées et construction des pentes
	<i>Exploitation</i>	Forage, tir à l'explosif, chargement, transport, et entreposage Dépendamment de la matière, celle-ci est conduite aux installations requises afin d'obtenir le produit final recherché pour la clientèle
		<i>Reconstruction</i>
<b>Fin des activités extractives</b>	<i>Fermeture</i>	Arrêt des activités extractives et des ventes
	<i>Restauration du site</i>	Mise en œuvre du plan de réhabilitation du site <i>après-mine</i> Surveillance et suivi selon les caractéristiques des dommages environnementaux causés

## 1.2 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette thèse est de mettre en relief les facteurs environnementaux inconstants ou imbriqués au cours des opérations ainsi qu'une proposition de mode de gestion moins fragmenté et intégrateur du temps. Ce but se subdivise en trois (3) objectifs secondaires :

- Réaliser une caractérisation temporelle des facteurs opérationnels, des facteurs environnementaux et de l'ordre d'apparition des risques environnementaux dans le cycle de vie d'une mine à ciel ouvert (MCO).
- Présenter comment les systèmes dynamiques peuvent s'intégrer aux éléments de la procédure de gestion environnementale des risques au cours des opérations minières.
- Intégrer de la modélisation temporelle de la notion d'évolution des risques.

La notion de risques étant la probabilité d'occurrence par la sévérité du risque et sa portée (ISO, 2015; ISO standards - IEC, 2009), les risques se développent donc de différentes manières. Elles apparaissent de manière continue, s'intensifient, évoluent, transforment les situations déjà à risque et peuvent apparaître de manière discontinue (la rupture des ouvrages de rétention par exemple, tremblement de terre, etc.). Cette notion d'évolution va être intégrée à l'hypothèse de recherche.

### **1.3 Hypothèses de recherche**

Les hypothèses ci-dessous sont celles considérées.

- En tenant compte de la notion d'évolution des risques de  $T_0$  à  $T_{n+p}$ , les matrices et la simulation rendent dynamique l'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE).
- La simulation dynamique est une passerelle positive pour la gestion environnementale d'une mine à ciel ouvert (MCO).
- Le temps influence les risques et leur probabilité d'occurrence durant le cycle de vie.



## CHAPITRE 2

### ÉTAT GÉNÉRAL DES CONNAISSANCES

Base de la prospérité industrielle, technologique et urbaine, l'extraction minière est devenue un secteur d'activité économique incontournable. Ceci, grâce aux caractéristiques inhérentes telles que la malléabilité, la ductilité, la conductivité de la chaleur et de l'électricité, l'utilité multiple et la durabilité de ces métaux ou minéraux (Pokhrel & Dubey, 2013). Cependant, il existe de nombreuses caractéristiques variables au niveau de ces matières premières. On note de la variabilité au niveau : 1) de la résistance des roches ; 2) des caractéristiques discontinues de la masse rocheuse ; 3) des caractéristiques chimiques qui changent une fois à l'air ou à l'eau ; 4) des opérations composées d'outils, de transformations ou d'intégration de produits chimiques ; 5) des paramètres environnementaux et ; 6) de l'impact des opérations. Et c'est l'interaction de ces éléments en contact avec les facteurs environnementaux qui favorisent le développement de risques au cours des opérations minières (Joughin, 2012; Mballo, 2012; Pokhrel & Dubey, 2013). Le risque se définit par la combinaison des conséquences d'un événement (ou changements de circonstances) et la probabilité d'occurrence en incertitudes (ISO, 2009, 2018a, 2018b; M. S. Lagnika, 2009) tandis que l'impact représente l'effet de ces incertitudes. L'incertitude quant à elle, c'est l'état (même partiel) de manque d'informations qui entrave la connaissance d'un événement et de ses conséquences (ISO 45001 :2018). Diverses sources de risques ou facteurs aggravants (FA) sont également à prendre en considération : l'usage de produits chimiques, les opérations d'excavation (responsables des émissions de particules, poussières et vibrations), les équipements (sources de bruits, vibrations, pollutions), l'entreposage des stériles, la délocalisation des populations, etc. L'occurrence des risques étant le résultat de changements, d'une exposition nocive suivie de conséquences, les mesures de mitigation se sont multipliées. En effet, plusieurs investigations sur la réduction des risques environnementaux découlant des mines ont été réalisées (Barbut, 2004; Kambani, 2003; Lintukangasa et al., 2012; Panov et al., 2011; Petavratzi, Kingman, & Lowndes, 2005). La gestion environnementale est ainsi devenue un enjeu majeur pour réduire ou éliminer les risques

environnementaux. Avec des législations et des pressions sociales plus exigeantes et capables d'hypothéquer la survie économique des industries, les organisations se doivent d'équilibrer leur rentabilité au progrès social et à la gestion des enjeux environnementaux (Zeng et al., 2010). Ceci non seulement pour gagner la confiance des parties prenantes, mais assurer aussi la pérennité de leurs activités (Botin, 2009; Chinbat, 2011; Doherty, 2000; Eggert, 2006). Les outils d'aide à la décision et les méthodes de gestion des risques comme : sont déjà utilisés pour déterminer la faisabilité des projets, les mesures de contrôle et d'atténuation des activités humaines, dont l'industrie minière (Evangelinos et al., 2014). Il s'agit de: 1) l'étude d'impact sur l'environnement (EIE) ; 2) des rapports techniques environnementaux (RTE) ; 3) des systèmes de gestion environnementale (SGE) ; et, 4) l'analyse du cycle de vie (ACV). Mais, ils ne freinent pas l'occurrence de plusieurs risques, leur portée et même l'émergence de nouveaux risques dans le temps (OIT, 2010). Généralement interreliés, ces impacts ont des conséquences qui déstabilisent l'équilibre écologique. Alors, face à ces enjeux, seule une approche de gestion intégratrice : des législations environnementales, des valeurs qualitatives des risques, des valeurs quantitatives des risques et des paramètres opérationnels, semblent être appropriée.

La fin du cycle du 20<sup>e</sup> siècle a été marquée selon Nobert et al. (2009) par trois (3) percées majeures : l'ordinateur, les technologies de l'information (TI) et internet, qui ne cessent encore d'être sujets à l'innovation. Parmi eux, les TI facilitent le transfert des données, les volumes de calculs complexes, la fiabilité et le stockage efficace d'informations. C'est ainsi que s'est développée la recherche opérationnelle offrant des outils numériques sur la base du principe de la dynamique des systèmes comme modèles de décision, d'optimisation ou de logiciels de gestion. En effet, plusieurs scientifiques en ingénierie ont intégré graduellement ce principe à la gestion de différents secteurs d'activités depuis 1961 (Akkoyun & Careddu, 2013; Dimitrakopoulos & Ramazan, 2008; Huang & Espley, 2005; Konyukh et al., 1999; Osanloo et al., 2008; Ramazan & Dimitrakopoulos, 2007; K. Rist, 1961; J. Sturgul, 1997; J. R. Sturgul, 2001). La modélisation par la simulation dynamique est une pratique connue des gestionnaires industriels parmi lesquels figurent des gestionnaires de mines (Vielma, Espinoza, & Moreno, 2009). Pour diverses raisons (étude des opérations minières, plan minier, fiabilité des équipements mobiles ou à technologie récente, système de transport,

optimisation des tâches, etc.), plusieurs modélisations ont été développées. La modélisation y est connue surtout au niveau : du processus des opérations; de l'aide à la décision ; de la conceptualisation et résolution de problèmes opérationnels dans des conditions multicritères ; de la modélisation dynamique pour le design des mines ou des fosses ; de la prévision du calendrier minier par la géomatique ; et de l'optimisation financière de la production. D'autres avantages sont cités par Bouloiz et al. (2013) : la visualisation des éléments du système, l'aide à la prise de décision, l'analyse de la complexité des facteurs influents avec les interactions et l'implantation de meilleures pratiques. Dans le cas des mines, l'application des systèmes dynamiques peut servir à réaliser des représentations qui vont faciliter les analyses du système et mieux explorer les influences subies en associant les notions de rétroactions et d'interactions. Force est donc de constater ainsi que les systèmes dynamiques ont démontré leur efficacité dans la résolution des problématiques sur la rentabilité financière et bien d'autres aspects, dont la sécurité. Qu'en est-il alors de la gestion environnementale ? Les principes des systèmes dynamiques peuvent-ils servir d'outil complémentaire à la procédure de gestion environnementale en place ? La littérature révèle en effet l'absence de modèles de gestion environnementale minière tenant compte du temps même si des simulations ou modèles dynamiques sont élaborés sur l'optimisation de leurs productions.

Mais, après avoir identifié les interactions possibles dans un système d'utilisation durable des ressources terrestres C. H. Yu et al. (2003) se sont servis de la modélisation dynamique. Et, ils ont pu déterminer des indicateurs d'aide à la prise de décision et ils ont trouvé des paramètres pertinents pour une gestion durable. C'est un résultat certes désuet, mais intéressant, car peu de recherches ont été réalisées à ce propos. Pourant, l'intégration de la notion d'évolution temporelle des situations à risques à la procédure de gestion environnementale peut avoir des bénéfices pratiques. Ceci dans l'appréciation des risques environnementaux des industries minières et cette intégration peut améliorer la procédure d'évaluation environnementale.

## 2.1 Enjeux reliés à la problématique

Cette section de la thèse expose les enjeux (Figure 2.1) liés à la problématique étudiée sur la gestion environnementale dans le secteur des mines, l'identification des impacts et le dynamisme de son système. Elle n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais elle rassemble les éléments d'intérêt se rapprochant des objectifs retenus. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître le cadre théorique qui circonscrit ce travail.



Figure 2.1 Enjeux relevés autour de la thèse dans la littérature scientifique

## 2.2 Définition des notions utilisées

À travers cette section, le cadre conceptuel comme le vocabulaire utilisé se précise et facilitent au lecteur la compréhension des notions exploitées tout au long du de cette thèse. Pour ce faire, plusieurs travaux scientifiques, normes internationales ou de guides et rapports techniques sont utilisés.



### **Mine à ciel ouvert (MCO)**

Depuis la surface, des ressources peuvent être extraites après fragmentation du minerai par abattage à l'explosif suite aux activités de forages qui laissent des fosses ouvertes dont la superficie varie dépendamment de la géologie et de l'intensité de production. Cette forme d'extraction est appelée à ciel ouvert. Particulièrement, en fonction du minerai extrait, une MCO est nommée également *carrière* (graviers ou calcaire, granite, autres roches/pierres) (Jébrak, 2015; Newman, Rubio, Caro, Weintraub, & Eureka, 2010). Certains pays comme le Bénin (en Afrique de l'Ouest) par exemple se distinguent par cette seule méthode d'extraction (S. B. Lagnika, Nadeau, & Ate-me-Nguema, 2012) qui se subdivise à son tour en deux catégories de mines : les carrières industrielles et artisanales. En effet, pour des fins économiques ou de subsistance et dans un cadre législatif moins rigoureux, les populations des régions abritant des formations rocheuses ou affleurantes se lancent dans l'exploitation artisanale des minerais, une vieille méthode datant de l'antiquité (Lu, 2012). C'est surtout l'usage manuel de techniques et d'instruments considérés archaïques qui lui confère ce caractère artisanal (DGM, 2006; Hayes, 2008). Par contre, la production étant dépendante de la position géologique du gisement et de la technique d'extraction, certains gestionnaires optent pour une extraction sous terre. Il existe donc un second type d'extraction quand le gisement est profondément enfoui dans le sol ou enfoui, mais à partir d'un affleurement léger en surface. Il s'agit des mines souterraines.

### **Mine souterraine**

C'est l'équivalent d'une usine aménagée sous terre pour extraire de la roche et en retirer des minéraux utiles sans déplacer d'importantes quantités de stériles comme dans les mines à ciel ouvert. Cette extraction en profondeur utilise un puits de mine vertical ou une *descenderie* pour atteindre le gisement après forage et fragmentation à l'explosif et nécessite des infrastructures spéciales : réseau de puits et galeries communiquant avec la surface et permettant la circulation du personnel comme du matériel ou du minerai. Toutes ces excavations sont desservies par des systèmes d'alimentation qui se doivent d'être efficaces en aération, en eau, en électricité et en air comprimé (Armstrong & Menon, 2000).

Cependant cette thèse n'aborde que la catégorie des mines à ciel ouvert industrielles. Les mines à ciel ouvert (MCO) sont généralement plus nombreuses que les mines souterraines (MAC, 2014). Par exemple, le Canada enregistre 129 MCO sur 92 mines souterraines. Aux É.-U. leur nombre a même augmenté de 2008 (93.8%) à 2014 (94.8%) contre 6.2% à 5.2% respectivement pour les mines souterraines (NIOSH, 2011, 2016). Kamulete (2014) explique cela par les avantages suivants des MCO : une meilleure sélection des gisements, la récupération simplifiée des minerais, un niveau plus faible d'insécurité, un coût plus faible de production par tonne, une grande souplesse de la planification des opérations d'extraction et de découverte, etc.

Il est important de mentionner que plusieurs aspects de ces deux (2) processus d'extraction sont communs. Alors, les contributions apportées sont également adaptables.

### **Aléa**

Il se définit comme une manifestation ou le produit de l'intensité par la probabilité d'occurrence d'un événement (Nicot, 2018).

### **Enjeu**

L'enjeu environnemental c'est une préoccupation majeure selon André, Delisle, et Revéret (2010) affectant l'environnement et qui peut faire pencher la balance de la décision en faveur ou en défaveur d'un projet. Au-delà du projet et indépendamment de la nature de toute activité, l'enjeu est la représentation des préoccupations environnementales sur les composantes ou les fonctions du milieu concerné (Conseil, 2012).

### **Vulnérabilité**

Le GIEC (2014) définit la vulnérabilité comme le degré par lequel un système peut subir ou peut être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité, les phénomènes extrêmes et auxquels un système est exposé ainsi que sa

sensibilité et sa capacité d'adaptation. Gillet et Babillot (2006) renchérisent cette définition avec la notion d'évolution de la probabilité d'occurrence, des aléas influents et l'intensité des enjeux. Le groupe Atlas de Barrette, Vandersmissen, et Roy (2018) définissent plutôt ce terme comme une condition qui résulte de divers facteurs (physiques, économiques, sociaux, environnementaux) et qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa, à en subir les préjudices. La vulnérabilité serait donc le niveau d'exposition que reflète l'élément du système qui subit les enjeux.

### **Risques et le risque sur environnement**

En effet l'aléa, l'enjeu et la vulnérabilité coexistent invariablement qu'il s'agisse d'un espace, d'un micro ou macro système, d'une activité, d'une usine et même d'un individu, générant des situations à risques et donc d'impacts environnementaux. Il existe une variété de définitions du risque (Aven & Renn, 2009). Pour Aven et Renn (2009), Castro, Gulías, Abalde, et Jorge (2008), le concept de risque est utilisé comme une valeur attendue, une distribution de probabilités, comme une incertitude ou un événement qui affecte négativement toute organisation. Le risque se caractérisant par sa fréquence et ses effets, M. S. Lagnika (2009) a défini le risque comme une situation dont l'occurrence est incertaine et dont la réalisation affecte les objectifs de l'entité qui le subit. Toutefois, selon Olivier et Herbert (2010) que ce soit en fonction des objectifs, de la discipline ou du secteur d'activité, la notion de risque demeure alors interdisciplinaire au niveau de ses composantes. Ainsi toute activité engendre des risques exogènes ou endogènes sur l'environnement et selon les circonstances et de la même manière, une organisation, source de biens peut devenir une source de risques dans son milieu. Le présent travail de recherche s'intéresse précisément aux risques négatifs des opérations minières.

### **Impact**

Selon la norme ISO (2015) 14001, l'impact environnemental c'est la modification (négative ou bénéfique) subie par l'environnement et résultant totalement ou partiellement des

interactions avec les éléments des activités d'un organisme. Cette thèse se conforme à l'idée qu'il s'agit de situations découlant de risques négatifs transformant l'état du milieu en impacts négatifs.

### **Facteurs environnementaux ou de l'environnement (FE)**

Un FE est une dimension physique ou un paramètre environnemental qui compose l'écosystème concerné. Les impacts de la dégradation environnementale d'après Bouvier (2006) et Carson (1962) mettent en évidence des liens entre les activités humaines, le milieu social et l'environnement concerné. Ces liens révèlent les facteurs de l'environnement sur lesquels ces activités humaines ont une influence. Ils peuvent certes varier dans leur composition d'un milieu à un autre, mais très peu dans leur nombre (M. S. Lagnika, 2009). ISO (2015) :14001 décrit un environnement incluant 9 facteurs : l'air, l'eau, le sol, les ressources naturelles, la flore, la faune, les êtres humains, leurs interrelations et d'autres caractéristiques. Dans le présent document, les facteurs sont également au nombre de neuf (9). Il s'agit de : la flore (végétation), la faune, du climat (atmosphérique, ambiance sonore), de l'hydrologie, des sols (géologie, hydrogéologie, géotechnique, géochimie, etc.), de l'économie, du paysage (géomorphologie, topographie), du milieu social (humain) et du sanitaire (santé, sécurité).

Ces FE sous l'influence d'autres facteurs externes ou internes à l'écosystème, peuvent transformer négativement le milieu. Il s'agit des facteurs de risques (FR).

### **Facteur de risque (FR) et facteurs de risques environnementaux**

Aubert et Bernard (2004) ont défini le facteur de risque comme une caractéristique ayant le potentiel d'affecter l'état initial d'une unité d'analyse et l'environnement de ce dernier. Ils ont distingué deux types de facteurs : endogène (unité d'analyse) et exogène (environnement de l'unité d'analyse). Wiehagen et Turin (2004) les définissent plutôt comme des actions et/ou des conditions qui augmentent la probabilité d'occurrence du risque. Ce qui ne

s'éloigne pas de la définition d'ISO 31000 :2018 (3.1) selon lequel les sources de risques sont des éléments en combinaison ou seuls pouvant générer des risques.

Ce travail se conforme donc à l'idée que : le facteur de risque est la caractéristique des actions ou des conditions qui affectent ou aggravent l'état initial d'une unité d'analyse et son environnement, transforment cet état en impact négatif à différents degrés et, par conséquent, augmentent la probabilité d'occurrence de ces risques ou ses conséquences.

### **Gestion environnementale (GE) des risques**

Le "PD ISO/IEC Guide 73 : 2002" devenu ISO Guide 73 : 2009 (2.1) définit le management du risque comme "*un ensemble d'activités coordonnées visant à diriger, à contrôler et piloter une organisation vis-à-vis du risque*" (British standards, 2002; ISO, 2009). Par ailleurs, le gouvernement canadien (2000), Poullain et Lespy (2002) définissent la gestion des risques par un effort organisé pour identifier, évaluer et réduire dès que possible les risques. C'est aussi un ensemble de mécanismes de surveillance et d'évaluations qui peut inclure des mesures directes ou indirectes pour réduire la probabilité, l'intensité, la fréquence des risques ou la durée de l'exposition à la contamination. OHSAS 18001 (2007) remplacé par ISO 45001 (2018b) définit la gestion des risques comme un processus d'évaluation des risques découlant d'un danger qui tient compte de la pertinence des mesures existantes, et de la portée qui y est associée. Avec ISO Guide 73 (2009), cette définition est bonifiée. Elle précise que d'autres éléments comme l'appréciation du risque, son traitement, son acceptation et sa communication, sont indispensables à la cohérence de la définition du terme de management du risque. Car la terminologie utilisée est "*management du risque*" aussi bien en anglais qu'en français au lieu de *gestion des risques*. Elle inclut les étapes de conception, de surveillance, de révision et d'amélioration continue du management du risque. Ceci, en tenant compte des quatre (4) éléments de base du risque : la probabilité, l'intensité, la durée et la variation des états depuis l'exposition jusqu'à la contamination des individus.

## **Modèle**

En dehors du fait que le modèle est la considération d'un individu ou d'un élément comme un idéal, un exemple ou une référence, il existe plusieurs aspects lexicographiques. Un modèle est "*une représentation schématique d'un processus, une démarche raisonnée*" selon Larousse (2008). Épistémologiquement, Birou (1966) le définit comme un système physique, mathématique ou logique qui représente les structures essentielles d'une réalité et capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement. Mais, d'un point de vue sociologique et anthropologique, il le définit autrement comme un schéma de référence, de conduite basée sur la culture admise en société et acquise quasi spontanément par chacun des membres qui y vivent. Selon Couture et Fournier (1997), il existe deux (2) concepts de théories scientifiques : celle qui est jointe aux lois ou règlements et celle qui représente la réalité par un modèle. Cette dernière encore peu connue dans les années 90 est finalement déclarée fertile par ces auteurs parce qu'il s'agit de représentations abstraites et idéalisées de phénomènes réels et plus complexes. Les activités extractives se révélant assez complexes, la représentation par un modèle s'adapterait bien dans le cadre de cette recherche. Aussi, c'est le terme «modèle» contrairement à «outil» qui va être utilisé. Le modèle sera donc une reproduction logique et dynamique du fonctionnement du système de gestion des risques environnementaux.

## **Systèmes complexes et systèmes dynamiques (SD)**

Le mot système provient du grec : *sustéma* et en langue française sa traduction est "*ensemble cohérent*". Selon l'approche systémique, un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but (Rosnay, 1975). Ces éléments d'un système sont liés les uns aux autres dépendamment des conséquences ou du lien entre eux. Tout système a des propriétés. Les propriétés sont les suivantes : le degré élevé ou faible de complexité, l'organisation hiérarchique des relations entre les éléments qui composent le système, la totalité cohérente que représente l'ensemble des composantes du système et l'interaction entre les éléments (Poussin, 1987).

Et ces propriétés correspondent au système dynamique des mines où les interactions sont multiples. Les systèmes anthropiques en place de nos jours ne sont plus aussi simples que dans le passé où la science pouvait se diviser en plusieurs champs disciplinaires distincts. Les problèmes que rencontrent ces systèmes ont perdu leurs relations causales simples, ont des impacts dont les dimensions dépassent les limites locales ou changeantes et se sont complexifiés en effet. De plus en plus complexe, la résolution de problèmes issus de ces systèmes anthropiques fait intervenir plusieurs disciplines à la fois pour trouver des solutions ce qui incite graduellement à une gestion multidisciplinaire des risques générés. D'ailleurs Checkland (1976) cité par Lapointe (1993) a affirmé que la fragmentation de la science en disciplines isolées constitue une faiblesse à renforcer par une gestion plus systémique. Les systèmes dynamiques selon Rosnay (1975) sont des combinaisons hiérarchisées où des éléments sont activement en interaction et organisés en fonction d'un but. Les propriétés sont : le degré de complexité, la coordination des relations entre éléments, la totalité représentée par l'ensemble des composants et l'interaction entre eux. L'environnement professionnel minier est un système complexe, dynamique et sujet à des transformations, où l'organisation de la totalité des composantes demeure en perpétuelle interaction les unes avec les autres. Les transformations concernent les environnements de travail, les postes de travail, l'aménagement de nouvelles aires de travail dont des postes de travail ou l'intégration de nouvelles technologies. En raison des interactions, la multiplicité des éléments d'un système (soit naturels, techniques, économiques et sociaux), Sterman (2000) et Bérard (2009), le qualifient de dynamique et complexe. Une caractéristique qui paraît évidente dans le cas d'une mine. En effet, elle se compose des minerais extraits avec des équipements ou technologies et de travailleurs qualifiés devant assurer un certain taux de production pour que l'organisation demeure concurrentielle, viable et assume ses responsabilités.

Avant d'aborder la démarche méthodologique utilisée et les résultats obtenus dans les prochains chapitres, la section suivante explique les défis environnementaux recensés.

### **2.3 Sommaire du recensement des écrits autour des principaux enjeux**

La revue de littérature s'articule autour de trois (3) points :

- 1 - risques environnementaux et impacts;
- 2 - enjeux de la gestion environnementale (GE) et facteurs environnementaux (FE) liés aux opérations minières;
- 3 - ouvrages de rétention (ORs) et gestion des résidus miniers.

#### **2.3.1 Risques environnementaux et impacts**

La production, les opérations, les émissions et les actions anthropiques additionnelles génèrent des impacts sur les facteurs environnementaux (FE) qui deviennent des situations à risque dans la mine. Ces risques multiples affectent tous les FE. Une situation qui favorise diverses perturbations. La contamination, les instabilités et les pollutions sont les effets les plus connus. D'ailleurs, Stumm et al. (2006), Naidu et al. (2003) et Skousen et Vance (2003) présentent la pollution comme une altération de l'environnement de l'homme de sorte que celui-ci lui devient défavorable, voire hostile, dans le cas d'une pollution avancée. Elle est causée non seulement par les contaminants (issus de la structure des éléments de la terre), mais également par des agents polluants, agents pathogènes suite aux actions ou opérations. Stumm et al. (2006) vont plus loin en déclarant que toute inadaptation de l'équilibre écologique à un élément étranger constitue une pollution. L'impact est un terme qui exprime l'influence des risques environnementaux. Il illustre la manifestation de la conséquence ou la portée de ces risques. Leurs impacts peuvent être importants, constants ou négligeables. Dans le cas de l'exploitation minière, les risques environnementaux et leurs impacts sont détaillés dans les chapitres 4 et 5.



### 2.3.2 Enjeux de la gestion environnementale (GE) et facteurs environnementaux (FE) liés aux opérations minières

Les enjeux sont multiples et dépendent des facteurs touchés. La Figure 2.7 récapitule neuf (9) FE souvent liés aux activités extractives. L'énumération des facteurs ne suit pas spécifiquement de clé de classification.

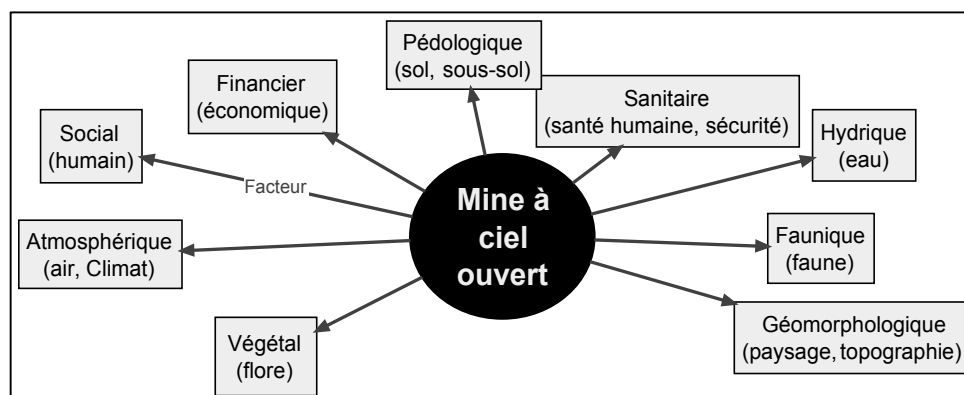


Figure 2.2 Facteurs environnementaux (FE) reliés aux opérations minières

Mais en plus de ces facteurs environnementaux sus mentionnés, l'existence de sous-facteurs ou sous-éléments reliant deux (2) ou trois (3) FE se rajoute, jouant un grand rôle sur la portée et la prolifération des conséquences environnementales. Ce qui génère des variabilités de toutes sortes et il en découle une diversité d'impacts. La chimie en est un exemple sensible et intrinsèque de l'ensemble de l'écosystème. Il existe des particules chimiques aussi bien dans le sol, le sous-sol, l'air, l'eau, le corps humain que dans les végétaux, etc. Et une fois la chimie de l'eau modifiée, sa qualité pour la consommation se trouve compromise, les organismes vivants (humains, animaux) en tombent malades, les activités halieutiques deviennent difficiles, la situation économique également, et le cycle négatif se poursuit. La Figure 2.8 illustre cette description.

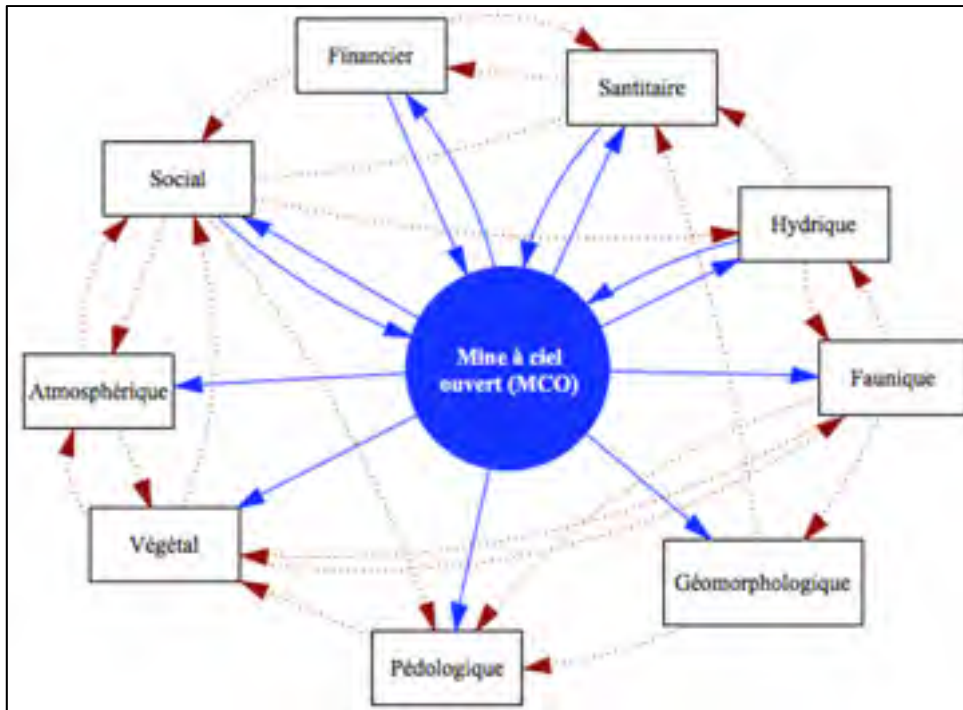


Figure 2.3 Liaisons, influences et interactions entre les FE dans le système d'une MCO

La majorité des enjeux environnementaux en lien avec les opérations minières a pu être identifiée. Dans le tableau 2.1 se trouve un récapitulatif bibliographique et non exhaustif de quelques risques.

Tableau 2.1 Récapitulatif des risques environnementaux (RE) miniers

Risques	Quelques publications
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altération pédologique</li> <li>- Altération de la qualité des eaux et des eaux souterraines</li> <li>- Incapacité de recharge des eaux souterraines et perturbations de la nappe phréatique</li> </ul>	Langer et Arbogast (2002); M. S. Lagnika (2004); Farmer (2013); Abdel-Dayem (2011); Fadiran, Dlamini, et Thwala (2014)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bruit</li> <li>- Vibrations</li> <li>- Émissions de polluants atmosphériques</li> </ul>	Donoghue (2004); Chun-Chin, Guor-Cheng, et Chao-Hung (2009); (Côté, Pelletier, & Lacharme, 2006; Dionne, Bourbonnais, Frémont, Rossignol, & Stock, 2004; Donoghue, 2004; Eisler, 2004; Elichegaray, 2008; Gratzfeld, 2004; M. S. Lagnika, 2004)

Tableau 2.1 Récapitulatif des risques environnementaux (RE) miniers (suite)

Risques	Quelques publications
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instabilité mécanique du sous-sol</li> <li>- Insécurité</li> <li>- Modification de la géomorphologie</li> <li>- Perturbation des propriétés géotechnique et géomécanique</li> </ul>	Caumartin (2007); Fleurisson et Grenon (2014); Michel Aubertin et al. (2002); M. Aubertin, Bussière, James, Mbonimpam, et P. (2013)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contamination des eaux</li> <li>- Déversements de produits chimiques</li> <li>- Contamination aux métaux lourds</li> <li>- Perte de la qualité de l'eau</li> <li>- Drainage acide</li> <li>- Comblement des cours d'eau</li> <li>- Érosion et sédimentation</li> </ul>	Butaré et Keita (2010); Keita (2001); INAP (2014); (McCullough, 2008); Fadiran et al. (2014); Donkor, Bonzongo, Nartey, et Adotey (2005); M. S. Lagnika (2004)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Destruction du couvert végétal</li> <li>- Déforestation</li> </ul>	Butaré et Keita (2010); Mballo (2012); Genivar (2008); Muray (2014); Redwood (2013); Fuentes, George, et Whittaker (2008); Keita (2001)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de surfaces agricoles</li> <li>- Destruction des habitats naturels de la faune</li> </ul>	Keita (2001); Edwards et al. (2013); URBIS (2013) Mertzanis, Papadopoulos, et Pantera (2005)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pressions sociales et urbaines</li> </ul>	IPEC (2013); UNECA (2009); Campbell et al. (2004); Observatoire de l'Abitibi-Témiscamingue (2010); Observatoire de l'Abitibi-Témiscamingue (2009)

La littérature révèle une forte pluralité de risques et impacts de toutes natures. Avec autant d'impacts, les opérations minières, quelle que soit la phase atteinte dans le cycle, ne sont plus considérées de manière isolée des éléments de cet environnement par les scientifiques ou praticiens. D'ailleurs, la phase «après-mine» constitue une part importante dans les considérations environnementales à cause de la portée des impacts qui va souvent au-delà de la fermeture des sites.

### 2.3.3 Ouvrages de rétention (ORs) et gestion des résidus miniers

Les résidus miniers n'ont pas de valeur commerciale, mais ils sont des sources de contaminations des écosystèmes. Leur entreposage nécessite donc des moyens financiers, une procédure de gestion stricte et une technologie pour sécuriser les sites afin d'empêcher leur déversement dans la nature. M. Aubertin et al. (2013) affirment que ces ORs peuvent circonscrire des centaines de millions de m<sup>3</sup> de rejets solides et liquides, entreposés sur des superficies atteignant plusieurs kilomètres carrés (km<sup>2</sup>). Kalantari, Ben-Awuah, et Askari-Nasab (2013) ont expliqué d'ailleurs l'évolution de la structure de ces ouvrages de rétention (ORs) en fonction de la quantité de résidus produits. Les ouvrages de rétention sont ces structures construites selon une architecture précise dans des contextes spécifiques où sont stockés ces résidus miniers ou l'eau potable pour une diversité de fins. Selon Boussicault (2007), ça peut être : la production d'hydroélectricité, la pisciculture, la lutte contre les incendies, la protection de sites, la prévention des crues, la prévention des inondations ou l'agriculture. Mais ces ouvrages décrits par Boussicault (2007) se retrouvent dans la littérature sous plusieurs étymologies : les digues de rétention ou de retenue et les barrages de rétention. Il a donc fallu distinguer les ORs *des eaux* (pour des besoins de consommation locale ou nationale), des ouvrages de rétention *des résidus miniers*, les données sur les ouvrages de rétention *des eaux* représentant au moins 65% des résultats des recherches effectuées.

Alors, les technologies de rétention étant faillibles, de nombreux cas de déversements ont été enregistrés – comme celui de la mine Germano (Brésil) en 2015 – compromettant ainsi les procédures de gestion environnementale sans cesse révisées au point où leur efficacité soit critiquée (Michel Aubertin et al., 2002; Azam & Li, 2010; Davies, 2010). Les organisations minières et les firmes de consultants spécialisées sont bien conscientes de ces enjeux, mais, à cause des caractéristiques complexes géotechniques et environnementales, la gestion de ces résidus représente encore un défi. Des investigations sur la physicochimie, minéralogie, mécanique, la conception ou la résistance mécanique des matériaux, microstructure des remblais, etc. sont effectuées à ce propos. D'autres efforts tels que ceux de la Commission Européenne (2009) sont déployés pour uniformiser les pratiques de gestion des résidus

incluant les méthodes d'analyse de stabilité. Devenant graduellement une préoccupation prioritaire pour les industries dépendantes de ces ouvrages de rétention, des recherches sur la gestion des risques reliés se révèlent indispensables. Mais, la majorité des recherches réalisées se focalisent plus sur les propriétés géotechniques qu'environnementales. Quelques auteurs ont abordé les lacunes existantes au sujet de ces ouvrages de rétention en pointant la procédure de gestion environnementale, mais sans confirmation tangible. Parmi eux, Tannant (2015) se distingue en proposant au ministère de l'environnement en Colombie-Britannique : le renforcement de la procédure de gestion environnementale au niveau particulièrement du suivi et de l'inspection. Cet état de choses expose la nécessité de réviser et renforcer la procédure de gestion environnementale existante.

### **1. Procédure de gestion environnementale et outils d'aide à la gestion**

Depuis que les sciences d'ingénierie ont intégré le développement durable à leurs politiques, un éventail de pratiques vertes basées sur les analyses de cycles de vie, la production *propre*, des méthodologies de performances environnementales, etc. a été développé (Cooper, Vigon, Curran, & Franklin, 2005; Evangelinos et al., 2014). Dans ce contexte, la gestion environnementale est devenue avec ISO 14001 (2004) selon Gendron (2004) un outil servant à contrôler, réduire leurs impacts et intégrer le post-mortem des activités avec ISO 14001 (2015). L'expérience mondiale face aux risques environnementaux dans les mines a entraîné la mobilisation des gouvernements, gestionnaires et des mouvements sociaux vers l'implantation effective de la gestion environnementale (EC, 2009; Hall, 2013; Kogel, Trivedi, & Herpfer, 2014; Pokhrel & Dubey, 2013). La figure 2.10 illustre brièvement ce cycle.

Toutefois l'application de la procédure de gestion environnementale se réalise de différentes manières ce qui a donné naissance à plusieurs *sous-outils*. Il y a six (6) groupes distincts bien que d'autres chercheurs comme Evangelinos et al. (2014) en ont identifié quinze (15). Les outils généralement adoptés par les gestionnaires dans le secteur minier sont : 1) l'EIE ; 2) les systèmes de gestion environnementale (SGE) ; 3) l'analyse du cycle de vie (ACV) ; 4) les rapports techniques environnementaux (RTE) ; 5) la comptabilité environnementale (CE); et,

6) les exigences légales (principe de précaution, les lois ou réglementations environnementales).

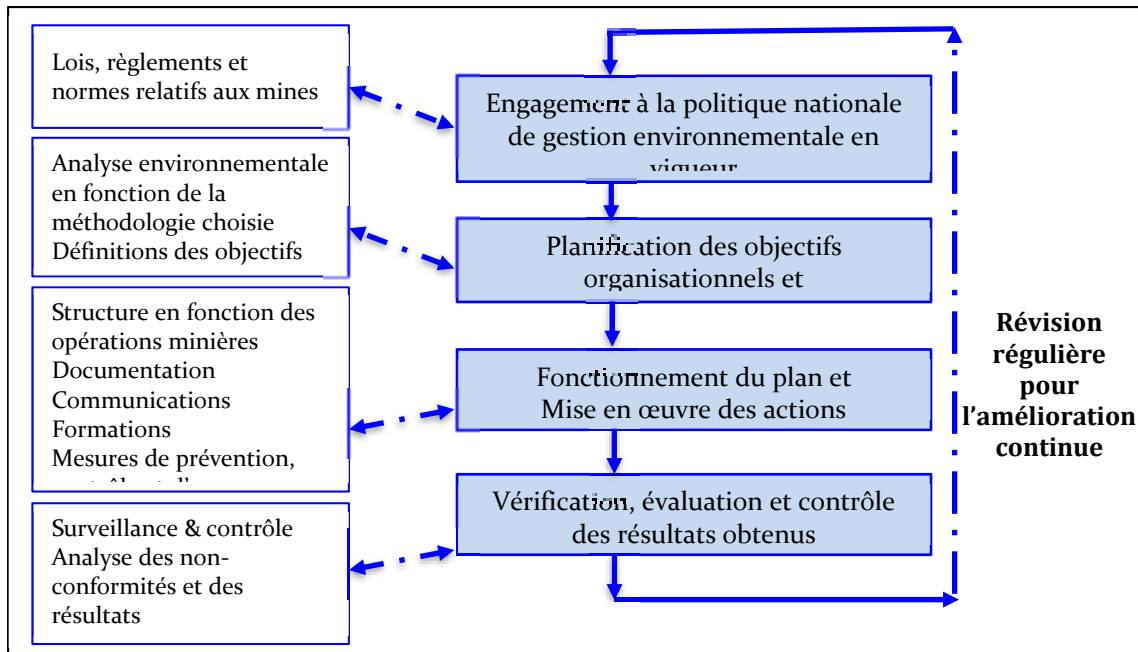


Figure 2.4 Cycle de gestion environnementale minière adapté au cycle de Deming, à ISO 14001 et aux résultats de Gendron (2004)

Ces outils pour la réduction des risques peinent toujours à favoriser la prise de décisions opérationnelles pour réduire ou éliminer les risques (Barbut, 2004; Kambani, 2003; Lintukangasa et al., 2012; Odell, 2004; Panov et al., 2011; Petavratzi et al., 2005). Alors, pour faciliter l'analyse du système dans lequel se trouve la mine et d'en explorer les moyens de maîtrise des impacts en temps réel, les systèmes dynamiques semblent être le champ de recherche à exploiter.

## 2.4 Synthèse de la revue de littérature

Le critère principal d'un système de gestion environnemental minier et comme dans d'autres secteurs d'activités est cette pratique régulière de révision ou de vérification : 1) à cause de la sensibilité des facteurs *écosystémiques* du milieu concerné; 2) de l'évolution des phénomènes

ou structures composant le milieu; 3) dans le but de maintenir un niveau de performance; et, 4) d'améliorer constamment la performance environnementale atteinte. Ce précepte à démontrer dans les résultats nécessite alors une observation régulière, globale et dynamique. Malheureusement, ce n'est pas toujours effectif à cause de la complexité des opérations au sein de ces secteurs d'activité et des liens interactifs avec les facteurs environnementaux. Pourtant, il existe d'autres mécanismes tels que les systèmes dynamiques capables de relayer les outils de gestion environnementale, supporter la représentation réelle des systèmes complexes de sorte à mieux exprimer individuellement les relations, faciliter des prises de décisions ciblées tenant compte de l'évolution des structures et de l'effet du temps. La figure 2.11 ci-dessus montre une comparaison des éléments pris en compte par les outils de gestion environnementale et des systèmes dynamiques.

La revue littérature confirme que les systèmes dynamiques ne sont plus des faits nouveaux pour le secteur minier. Ce dernier utilise la dynamique des systèmes pour bien d'autres aspects de sa gestion opérationnelle pour l'optimisation de la production où on enregistre un volume important de publications et au niveau de la gestion des risques opérationnels.

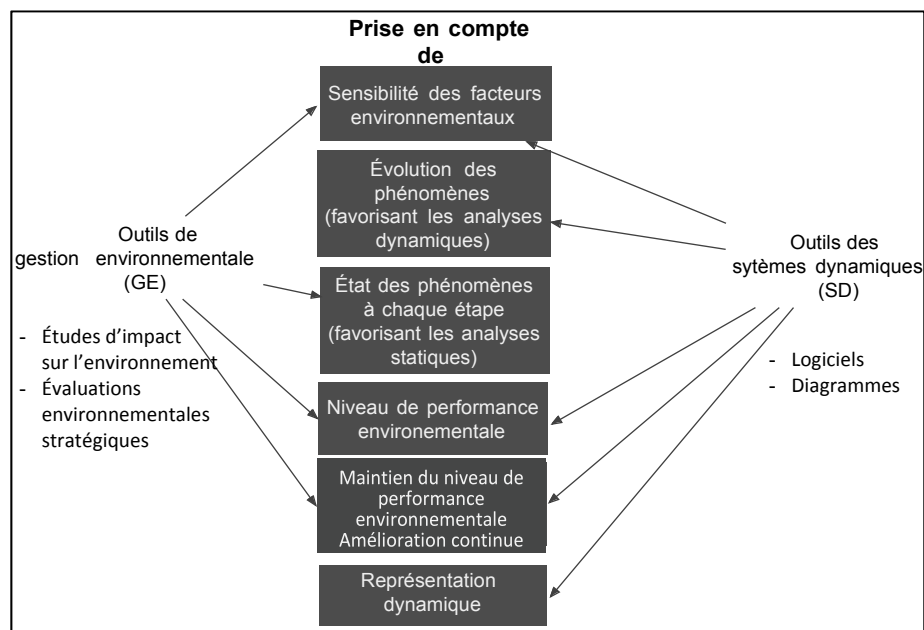


Figure 2.5 Illustration comparative entre les outils de gestion environnementale existants et des systèmes dynamiques

En réalité bien que l'application des systèmes dynamiques ait du succès et soit capable de contribuer valablement à une gestion globale, très peu de gestionnaires ou scientifiques l'abordent dans la gestion environnementale. Une synthèse au Tableau 2.2 présente un récapitulatif de l'utilisation abondante ou délaissée des systèmes dynamiques dans les mines.

Tableau 2.2 Synthèse de la revue de littérature sur la gestion environnementale minière (GEM) et les SD

Sujets couverts par les revues scientifiques parcourues	Domaines étudiés					
	GE	RE et outils de gestion	Modélisation dynamique : conception de mines / de fosses - optimisation de la production minière, financière et planification	Gestion des risques hydriques dans les MCO	SD et SiD des opérations minières	Gestion des RE par es SD dans les mines
Évaluation des RE ÉIE et rapports techniques pour la validation des projets miniers	√√√	√√√		√√√		
Exploitation minière et problèmes environnementaux	√√√	√√√		√√√		√
Enjeux hydriques et résidus miniers	√√√	√√√	√√	√√	√√	
Mécanique appliquée et matériaux		√	√√√		√√√	
Santé	√√√	√√√		√√	Pas dans les mines	
Environnement atmosphérique	√√√	√√√		√√√		
Géologie	√√√	√√√	√√√		√√	
Recherche sur la production propre, l'environnement et la durabilité	√√√	√√√	√√√		√√	

**Légende** : Nombre de références √√√ : 10< - √√ : 3<x<10 - √ : <3;

 Documentation quasi inexistante



Sans être exhaustive, cette revue a couvert l'aspect général des approches connues ou développées pour l'exploitation minière et sur les systèmes dynamiques. Elle aura permis de prendre connaissance des forces, des faiblesses, de l'étendue et des limites des méthodes et réflexions développées par les praticiens ou chercheurs. En intégrant ainsi simultanément tous les aspects couverts jusqu'à ce jour, le tableau 2.2, expose l'énorme champ d'application des systèmes dynamiques, la complexité des mines à ciel ouvert et la *non-intégration* des systèmes dynamiques à la gestion environnementale minière (GEM).



## CHAPITRE 3

### MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

#### 3.1 Fondements méthodologiques et structure de la démarche proposée

Face à l'absence d'une méthodologie standardisée des systèmes dynamiques pour la gestion environnementale minière (GEM), ce travail propose une démarche scientifique sans dépasser pour autant l'état exploratoire. La cible est toute mine à ciel ouvert (MCO), quel que soit le minerai dans le but de proposer un mode de gestion environnementale correspondant à l'occurrence dynamique des risques. Ainsi, ce projet de recherche va décrire les activités d'extraction (phase de projet et en opération), les relations entre les variables, les variétés de probabilités d'impacts, les sources de risques environnementaux et leur amplification dans le temps. Chacune des résultantes de cette démarche est reliée et est sanctionnée par une publication scientifique. Chaque publication est réalisée selon un mode opératoire individuel cependant la méthodologie générale adoptée après la formulation du problème, comprend quatre (4) étapes :

- 1 - *La collecte de données.* Ce travail débute par une revue critique de la littérature (Chapitre 2) sur la GEM depuis l'évaluation environnementale, le succès des outils de gestion environnementale jusqu'ici à l'utilité des systèmes dynamiques, et le recueil approfondi de données environnementales sur les opérations minières. Cette collecte a pris un aspect particulier à travers les recueils historiques systémiques des risques environnementaux connus ou spécifiques, des opérations minières et des facteurs environnementaux (FE) suivis de leurs sous-facteurs comme des variables moins apparentes, mais dont la sensibilité impacte la nature du FE qu'elle compose. Cette collecte a donc permis de ressortir son originalité de la problématique.
- 2 - *Intégration du temps et la recherche-action.* L'intégration du temps ( $T_0$  à  $T_{n+p}$ ) et de la variabilité des paramètres dans la gestion environnementale selon le développement d'une MCO. Un intérêt pour la superposition polyptyque des données obtenues sur la variation des indicateurs, des paramètres potentiels d'opération et des risques depuis

l'état de projet minier aux opérations, a suscité des investigations sur l'applicabilité du dynamisme dans la gestion environnementale. Un bilan des impacts potentiels d'une mine à ciel ouvert (MCO) et de ses paramètres d'opération a été réalisé grâce aux matrices du type Léopold. Elles fournissent à la fois des fiches d'impact, des données quantitatives et qualitatives qui correspondent à des valeurs proches de la réalité. Ainsi l'évaluation multicritère et le suivi des impacts sont possibles depuis l'état de projet à la mine en opération.

La recherche-action est la perspective utilitaire par laquelle, la recherche est l'instrument des actions, des rétroactions et des interactions que pose et subit le système impliqué. Elle offre une souplesse méthodologique et le choix des instruments appropriés. Goyette et Lessard-Hébert (1987) et Morin (2010) trouvent que cette technique novatrice s'adapte très bien aux contextes complexes tels que ceux des mines et aide mieux le chercheur à observer, analyser et déduire de nouvelles connaissances acquises. En faisant appel à cette méthodologie concrète d'acquisition des connaissances pour régler des problèmes étudiés, la recherche-action a été utilisée à ce second stade de la méthodologie générale. Ceci en se basant sur les données réelles de onze (11) mines canadiennes ayant obtenu l'approbation gouvernementale d'opérer, dont le chercheur s'est servi ici pour caractériser et déterminer les risques. Cette étape des travaux a démontré l'adéquation et l'étendue du champ d'application des systèmes dynamiques à la gestion environnementale minière ou dans toute autre industrie similaire.

3 - *Démonstration de la nature intégrative des systèmes dynamiques*. La simulation en plus de s'intéresser à l'étude des organisations d'une façon globale, est la description du système et de la dynamique des éléments qui les compose. Les outils existants pour l'analyse des risques ne sont pas directement applicables. L'ingénieur ou le gestionnaire désigné va devoir les adapter au contexte.

4 - *Analyse dynamique selon le facteur environnemental (FE) sélectionné : étude de cas*. Les modélisations qu'elles soient théoriques ou fonctionnelles, se basent principalement sur l'observation, la reconstitution et l'analyse par laquelle le chercheur identifie et caractérise les interactions ou relations existantes (FE, facteur de risque, cible, parties prenantes). Dans le cadre de la thèse, cette représentation dynamique s'est faite avec un seul FE sélectionné afin d'alléger les observations et de mieux remarquer la validité des

paramètres étudiés. Cette phase a favorisé l'analyse dynamique multicritère de l'évolution des risques dans le système d'une mine à ciel ouvert (MCO) et la confirmation du rôle temporel, un des moteurs de développement ou de prolifération des risques environnementaux. La modélisation de cette activité a pu être élaborée grâce au logiciel Vensim. Le système minier a été décomposé de sorte à révéler les liaisons, les influences positives ou négatives et les facteurs aggravants également.

Cette méthodologie (Figure 3.1) est complétée et développée dans les résultats, car chaque contribution a été réalisée selon une méthodologie propre aux objectifs spécifiques.

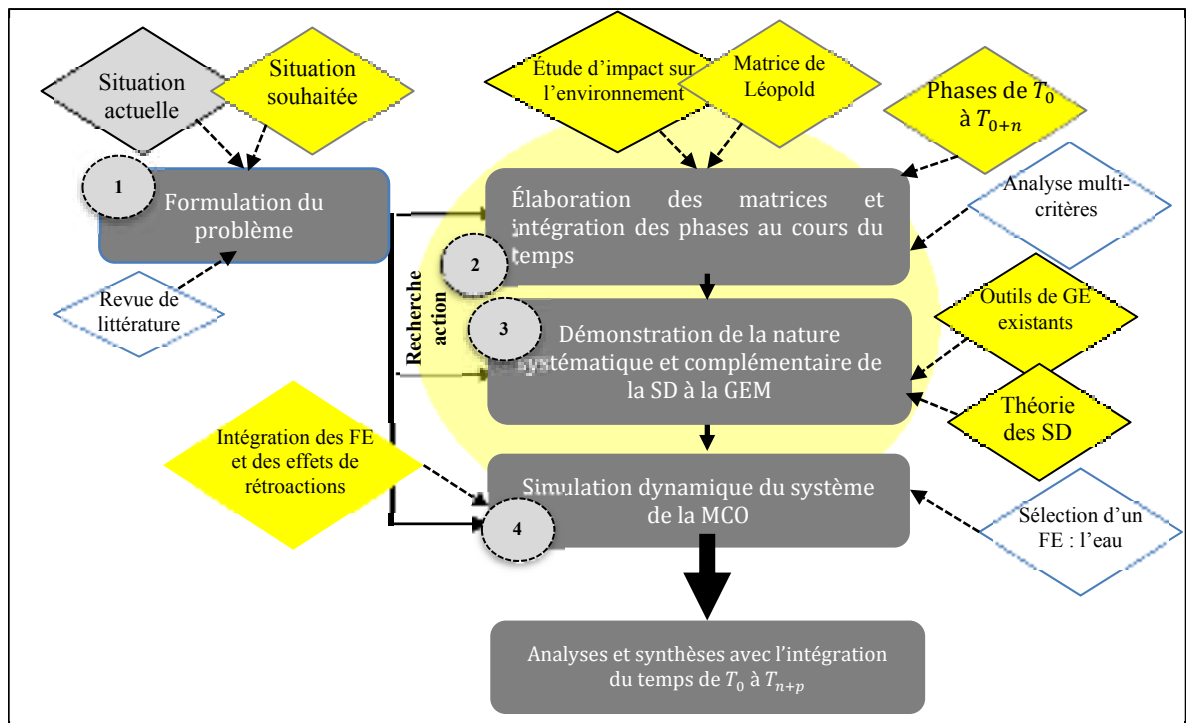


Figure 3.1 Démarche méthodologique de recherche proposée pour les travaux réalisés

## 3.2 Matériel et procédures

### 3.2.1 Base de données et cueillette des données

Les bases de données ayant servi sont diversifiées. Elles proviennent de maisons d'édition internationales ou nationales de journaux ou livres académiques avec différentes filiales. Ce sont des sources de publications scientifiques stockées où le chercheur peut retrouver l'intégralité des données ou d'informations relatives à ses besoins. Ici, Compendex, IEEE Explore, Safety Science, Taylor & Francis group, Google scholar, Springer, Wiley online et Emerald sont celles couramment exploitées tout au long du cursus. D'autres se rajoutent certainement, mais avec un volume moins important. Par ailleurs, les normes également comme ISO, OHSAS, CSA, British Standards, etc. et certaines guides (NIOSH, ISO, etc.) ont favorisé la revue de littérature et certains approfondissements. Généralement informatisé de nos jours, l'accès à ces bases de données est facilité par internet. Mais, pour faciliter la recherche d'informations, il a été important de déterminer la cible visée, de définir l'unité de recherche et la population concernée. Force est de mentionner que toutes les mines analysées ici restent sous le couvert de l'anonymat. Leur identification n'étant pas pertinente aux besoins des résultats. Le travail s'est fait également par le biais de l'interface *homme-machine* internationalement connue : l'ordinateur. Ce qui signifie qu'elle n'implique aucun participant humain.

#### 3.2.1.1 Modélisation

La littérature définit la modélisation comme une opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants (Giraud, Pamart, & Riverain, 1971). La modélisation des phénomènes ou des interactions à l'intérieur d'un système est le fait d'être capable de reproduire dynamiquement son fonctionnement de sorte à pouvoir l'expliquer. Giraud et al. (1971) définissent donc la modélisation comme une «opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin de l'étudier plus et de mesurer les

effets des variations de ses éléments composants sur lui». Cette reproduction dynamique constitue ainsi la limite confondante entre la modélisation et la simulation. D'ailleurs, la notion de «modélisation» pour certains auteurs s'assimile également à la «simulation». Dans cette thèse, la modélisation se limitera à la représentation graphique et sommaire du système tandis que la simulation au-delà du graphique sommaire (modélisation) et de l'intégration de modules mathématiques va s'étendre à la mise en œuvre du système sur une échelle de temps dans un logiciel approprié.

### ***3.2.1.2 Simulation***

La simulation selon Centeno (1996) a tendance à être un processus itératif dans lequel un modèle est conçu, un (ou plusieurs) scénario (s) est défini (s), l'espace temporel  $t$  est défini entre 0 et  $t_f=0, \dots, n$ , les résultats analysés, plusieurs expériences sont faites, et ainsi de suite. Une telle modélisation tient compte du milieu de travail et peut convenir à une diversité de milieux industriels. Et dans une synchronisation qui se veut logique et efficace, l'organisation de la totalité des opérations minières étant essentielle à la production, celle-ci nécessite des interactions entre tous les éléments de son système. Et c'est en raison de ces interactions et de la multiplicité des éléments impliqués (naturels, techniques, économiques et sociaux) qu'un tel système selon Sterman (2000) et Bérard (2009) est considéré dynamique et complexe. Le logiciel de simulation utilisé ici est Vensim (voir la section sur «Systèmes dynamiques (SD) et logiciel Vensim»).

### **3.2.2 Logiciel de simulation retenu**

Méthodologiquement, cette recherche s'est inspirée de la méthode standard de représentation des systèmes dynamiques de Sterman (2000). Le logiciel Vensim offre cet environnement de simulation pour modéliser une ou plusieurs opérations ou interactions variables dans le temps. Correspondant aux besoins de cette recherche, Vensim a permis de développer un modèle préliminaire dynamique et un diagramme de boucle de causalité (DBC) afin de

cerner les paramètres à considérer efficacement et avec raisonnement tout en évaluant leur sensibilité.

### **3.2.3 Systèmes dynamiques (SD) et logiciel Vensim**

Vensim en tant que logiciel de simulation n'est pas un nouvel outil dans l'environnement scientifique. Il a été développé en 1988 à l'institut de technologie de Massachusetts (MIT, *Massachusetts Institute of Technology*) sur la base des théories de Jay Forrester (1961) et a servi avec succès dans plusieurs domaines, dont certaines sphères de l'exploitation minière. Bouloiz et al. (2013) expliquent cela par la particularité de cette approche sur la syntaxe neutre et indépendante du champ d'application des systèmes dynamiques. Mais l'utilisation du logiciel n'étant pas l'objectif primaire de cette thèse, son mode d'usage va se limiter aux simples détails ci-après pour faciliter la compréhension du lecteur.

#### ***3.2.3.1 Flux***

Le flux détermine les variations au niveau des variables d'état. En l'absence de flux, aucun changement n'est possible. En transitant par ces variables, il modifie leur état, traduisant ainsi les différents effets des forces capables d'agir sur le système.

#### ***3.2.3.2 Variables auxiliaires ou constantes***

Les variables auxiliaires déterminées ou constantes en fonction du temps  $t$  ou d'une variable quelconque permettent d'associer par un canal, des flux variés selon des relations logiques, linéaires ou non, par exemple un flux de stériles et un flux de contaminants.



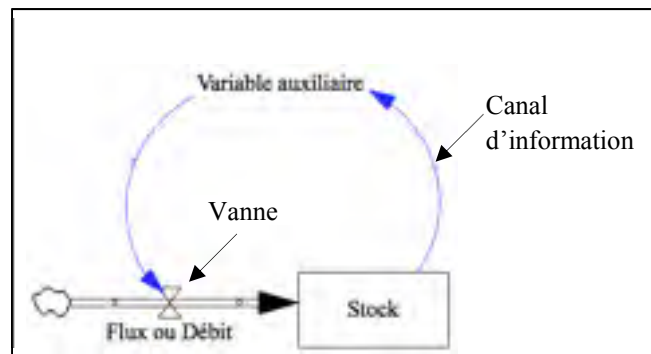


Figure 3.2 Représentation d'une variable auxiliaire

Elles sont représentées simplement par le nom de la variable, apparaissent dans le canal d'information et sont très utiles pour intégrer de l'information qualitative, retenir et retarder les délais dans les modèles toujours par un canal d'information. Les systèmes dynamiques ayant deux (2) aspects importants mis en relief de nouveau par Bouloiz *et al* (2013) à savoir : l'étude systémique du concept de rétroaction et l'étude dynamique du comportement du système, Vensim est le logiciel par excellence couvrant l'ensemble des facteurs incontournables de cette approche.

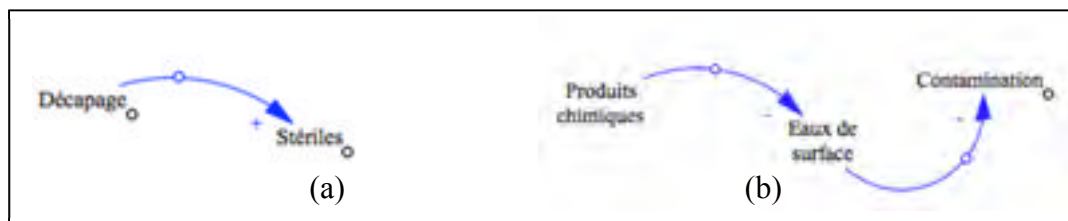


Figure 3.3 Variables auxiliaires avec canaux d'informations positif (a) et négatif (b)

En effet, la notion de rétroaction est un élément indissociable des systèmes dynamiques où les interdépendances positives ou négatives, interactions positives ou négatives et les impacts positifs ou négatifs sont absolument mis en relief. Cette évidence est traduite dans Vensim par les diagrammes de boucles de causalité (DBC) avec des canaux d'informations positives (+) ou négatives (-) illustrés aux Figures 3.5 et 3.6.

Dans un processus continu, la rétroaction représente les effets secondaires d'une action sur une variable du système d'un moment  $t$  à un autre  $t_{n+p}$ . Les actions ou décisions modifient effectivement l'environnement, conduisant à des conséquences ou des effets secondaires ou de nouvelles décisions à effets positifs ou négatifs en chaîne. L'analyse de ces chaînes montre des formations linéaires, mais ce sont les formations en boucles qui sont généralement observées. Selon Rarrbo (2010), une boucle positive est considérée comme une «entité autoamplificatrice» où toute action sur l'une de ses variables du système augmente sa valeur initiale ou crée une nouvelle variation évoluant dans le même sens de celle-ci. Dans le cas contraire, on parle de boucle négative lorsque cette variation crée un effet inversé entre les éléments ou une baisse.

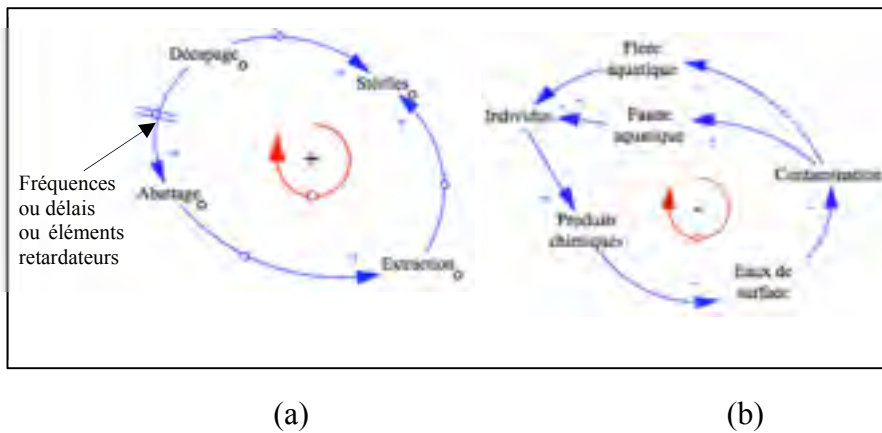


Figure 3.4 Boucles à polarité positives (a) et négatives (b)

## CHAPITRE 4

### ARTICLE 1 : DYNAMIC MATRIX FOR AN ADAPTIVE ENVIRONMENT MANAGEMENT IN MINING: A FEED-ENGINEERING ALTERNATIVE?

S. B. Mondoukpè Lagnika <sup>a</sup>, Robert Hausler <sup>b</sup>, Mathias Glaus <sup>c</sup>

<sup>a, b, c</sup> Department of construction engineering, École de technologie supérieure, Canada

Article publié dans «Environmental Management and Sustainable Development» (production de Macrothink Institute), Vol.7, n° 2 de Mai 2018

#### Résumé

Les impacts sur l'environnement sont généralement identifiés par des systèmes d'évaluation et de quantification dérivés de plusieurs méthodes, dont l'évaluation environnementale, l'élaboration des matrices et le recoupement des données. Cette étude utilise un ensemble de données obtenues à partir d'études d'impact sur l'environnement (ÉIE) minier validées, de certains rapports de surveillance et d'analyses scientifiques sur les mines à ciel ouvert (MCO). Le but de cette étude est de construire un système de matrices dynamiques temporel pour faciliter une évaluation systémique des mesures de prévention des impacts environnementaux et une prévention en profondeur des risques dans toute MCO. Les quatre matrices dynamiques sont alors élaborées chacune avec des valeurs qualitatives et numériques correspondantes à l'importance et l'ampleur. L'un des enjeux étant de minimiser les risques négatifs dans les mines à ciel ouvert, un premier résultat souligne les facteurs environnementaux des opérations minières sensibles aux variations dans le temps ainsi que la variabilité des paramètres eux-mêmes. Les résultats montrent ensuite que les données (qualitatives et quantitatives) varient du stade d'ÉIE au stade de post-ÉIE tel que le nombre d'activités vs le nombre de facteurs environnementaux. Troisièmement, l'impact des activités sur chaque partie des composantes de l'environnement et l'incidence de toutes les activités au cours du cycle de vie des mines est plus facile à identifier, quelle que soit la densité des données. En quatrième ligne, cet article indique comment la matrice dynamique offre une

alternative optimale dans le processus de détermination des mesures préventives pour atténuer les risques et la nécessité d'un programme de suivi environnemental interactif dans l'industrie minière ou similaire. Cette approche réduit les faiblesses du programme de surveillance et en tant qu'approche *décisionnelle* multicritère, elle permet aux gestionnaires de prendre des actions éclairées.

**Mots-clés** : Suivi environnemental, EIE, matrice, Évaluation, Temporel, Risques, Open-pit, Programme de suivi

### **Abstract**

Environment impacts are usually determined by quantification or an evaluation system derived from several methodologies including environmental assessment, matrices, and data cross-referencing. This study uses a dataset obtained from validated mining Environmental Impact Assessments (EIAs), some monitoring reports and scientific insights on open-pit mines (OPM). The purpose here is to build a dynamic matrix system over time to facilitate a systemic evaluation of environmental impacts and to find in-depth preventive measures in any OPM. The four dynamic matrices are built with qualitative and numerical values in both magnitude and significance terms. As one of the issues is to minimize negative risks in OPMs, one outcome points out the environmental factors of mining operations sensitive to the variations over time and the variability of the parameters themselves. The results show secondly that the data (qualitative and quantitative) vary from EIA stage to a post EIA status like activities or environmental factors numbers. Thirdly, the impact of activities on each part of environment components and the incidence of all activities during the mines' life cycle is easier to identify whatever the data density. In the fourth line, this paper indicates that the dynamic matrix is an optimal alternative in the process of determining preventive measures to mitigate the risks and the need for an interactive environmental follow-up program in mining or similar industry. This approach reduces the following-up monitoring weaknesses and allows managers, as a multi-criterion decision-making approach, to take enlightened actions.

**Keywords**: Environmental monitoring, EIA, Matrix, Assessment, Over time, Risks, Open-pit, Follow-up program

#### **4.1 Introduction and scope of study**

Environmental assessment is an innovative tool that has revolutionized anthropogenic impacts on the environment and has improved since the Rio conference (M. S. Lagnika, 2009). Born in the 1970s, environmental assessment was established first to satisfy growing public concerns on our ecosystem but also to pursue and better develop industrial activities (Bouvier, 2006; Gorova, Pavlychenko, Borysovs'ka, & Krups'ka, 2013). In order to reduce, regulate, control or adjust environmental risks arising from human activities, environmental impact assessment (EIA) is the best known tool to date before implementing any industrial projects (Evangelinos et al., 2014). EIA, for its part, is a crucial internal step in any project involving negative impacts on the ecosystem where it must be implemented. In turn, EIA consists of two phases that best ensure the identification of risks: (1) corresponding mitigation measures and (2) monitoring of activities from construction to the end of industrial activities. Among all the industries, mining is the one who afflicts the whole environmental factors (geomorphic, soil, atmospheric, water, acoustical, social, vegetal, wildlife, financial and so on) (Chinbat, 2011; Pokhrel & Dubey, 2013). M. S. Lagnika, Hausler, et Glaus (2017) and many other authors highlighted numerous risks associated with operation mining on the surrounding environment where the industry is based. In Canada and in Quebec, there are different impact assessment procedures by region, but in most of the cases, a mine exceeding 7000 Tons of minerals is subject not only to the EIA but also to a public hearing. These procedures are supposed to help managers to develop and operate their mining project in an environmentally responsible and safe manner at all levels for the benefit of communities and stakeholders. However, the observed data of EIA procedures under environment Act of Gouvernement du Canada (2017), environment quality Act of Gouvernement du Québec (2017a) and sustainable development Act Gouvernement du Québec (2017b) regulation respecting the review shown in figure 1, form a sufficient composition which can enable a good management.

The procedure takes into account: the purpose of the project, the environmental effects of the mine preparation, their scope, the significance of the effects mentioned, public comments

(public hearing), mitigation measures including feasible alternatives, the follow-up program, and monitoring.

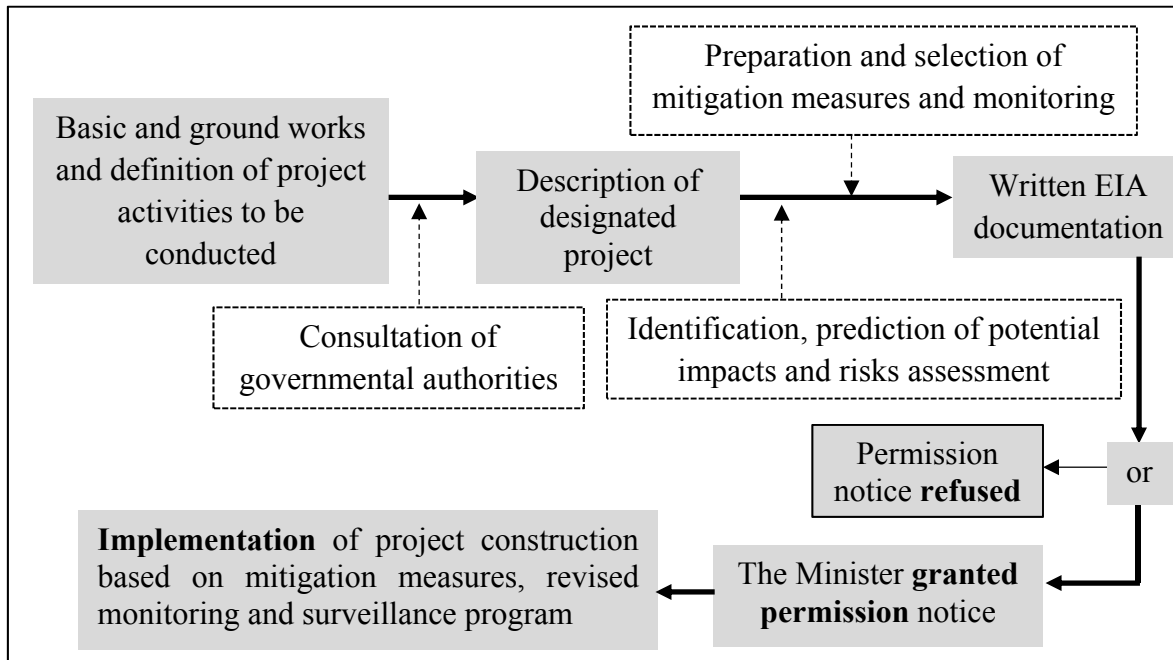


Figure 4.1 EIA regulation respecting Canada and Quebec laws.  
An adaptation of Canter (1982)

But, despite the effectiveness of EIA, there are still problems that disrupt the ecosystems once mines are put into operation. Some collapses or failures of dams occurred over the world are registered: a coal mine at Saunders (USA, 1972), in Stava (Italy, 1985), in Spain (1998), in Sweden (2000) and in an aluminium mine at Kolontar (Hungary, 2010). Also, authors notice significant pollution and environmental degradation around extraction operations and production processes (Křibeka, De Vivob, & Davies, 2014; Singh, Ihlenfeld, Oates, Plant, & Voulvoulis, 2011). Others do not hesitate to expose the impacts of unbalancing incidences on basic human need as loss of soil fertility, air contamination by dust, health and safety issues, acidification of wastewater, destabilization of: groundwater, wildlife, geomorphology, etc. (Agbo & Honkpehedji, 2009; M. S. Lagnika et al., 2017).

These are the reason why authors like Bouvier (2006) still consider that the potential of impact assessment is not exploited. Indeed, earlier Duinker (1989) argues that the basic goal

of reducing risks in predictions is to generate a temporal time series of surveillance data and verify them. Actually, the EIA procedure requires environmental monitoring at the project construction but, the realization of a follow-up program at the end of the activities does not allow enough time to observe the evolution of the risks between the two big phases (project phase and operation phase). Bibliographic research carried out during this work through six scientific databases (Emerald Insight, Wiley & son online, Engineering village, Google scholar, Taylor & Francis and IEEE Xplore) revealed very few articles on Leopold's matrix, multi-criterion assessment studies and the weighting of impacts on many activities like irrigated dam but none in mining. Few investigations carried out on this topic between 1982, 1989 and 2017 highlight the weaknesses of environmental follow-up, which is the centerpiece of the EIA. These precedents show the lack of studies or investigations made by practitioners or scientists to improve more the tool which is useful for human activities and ecology control. In view of this inevitable livelihood of uncertainties in our dynamic ecosystems, MacKinnon (2017), insists recently for an ongoing adaptive approach to following-up environmental impacts. To do so, temporal data have to be set before the project construction and while the mine is put into operation. Then, depending on the severity of each risk and the mitigating or aggravating factors, the measures have to be chosen appropriately in order to know precisely and remedies widely the actions responsible for the negative impacts. Later, the action plan should be determined or adapted under the incurred circumstances.

## **4.2 Research methodology**

The aim of this paper is to carry out a dynamic matrix system to facilitate a systemic evaluation of environmental impacts and to observe the variability into the risk parameters in any OPM. An analytical framework of the obtained data as shown in figure 2 describes it. The methodology process is an evolving cycle that can be distilled down to six stages. First, the problematic is identified. Secondly, the grid holds the information and criteria around specific inclusion and exclusion factors.

The inclusion factors are: "to be a mining organization that operates as an open-pit and to obtain the permission notice from the government's. The exclusion factors are to be: "an underground mine or an open-pit mines (OPM) organization that has not yet obtained the permission notice/ an OPM that cannot produce more than 7,000 tons because this is not subject to EIA/ a proposed expansion and development of OPM or not/ an OPM with an incomplete EIA". Representative OPM data from the literature review and EIA that have been approved by the government, will serve as a basis for these numerical and qualitative analyses.

So, following the step of the selection of these factors, a technical review of the assessments, 11 EIA reports with public hearing reports shown in the Table 1, several scientific articles, technical reports, federal and provincial legislation were studied in depth. From those results, the environmental factors, the significance of the impacts according to the value of the environmental component (VEC) as well as the intensity with the extent, were determined and harmonized throughout this work. Then, the matrices were developed and later, a sensitivity analysis was done to compare the results from EIA step to the post-EIA step.

So, following this, a technical review of the assessments, 11 EIA reports with public hearing reports, several scientific articles, federal and provincial legislations were studied in depth. From those, the environmental factors, the significance of the impacts according to the value of the environmental component (VEC) as well as the intensity with the extent, were determined and harmonized throughout the text.



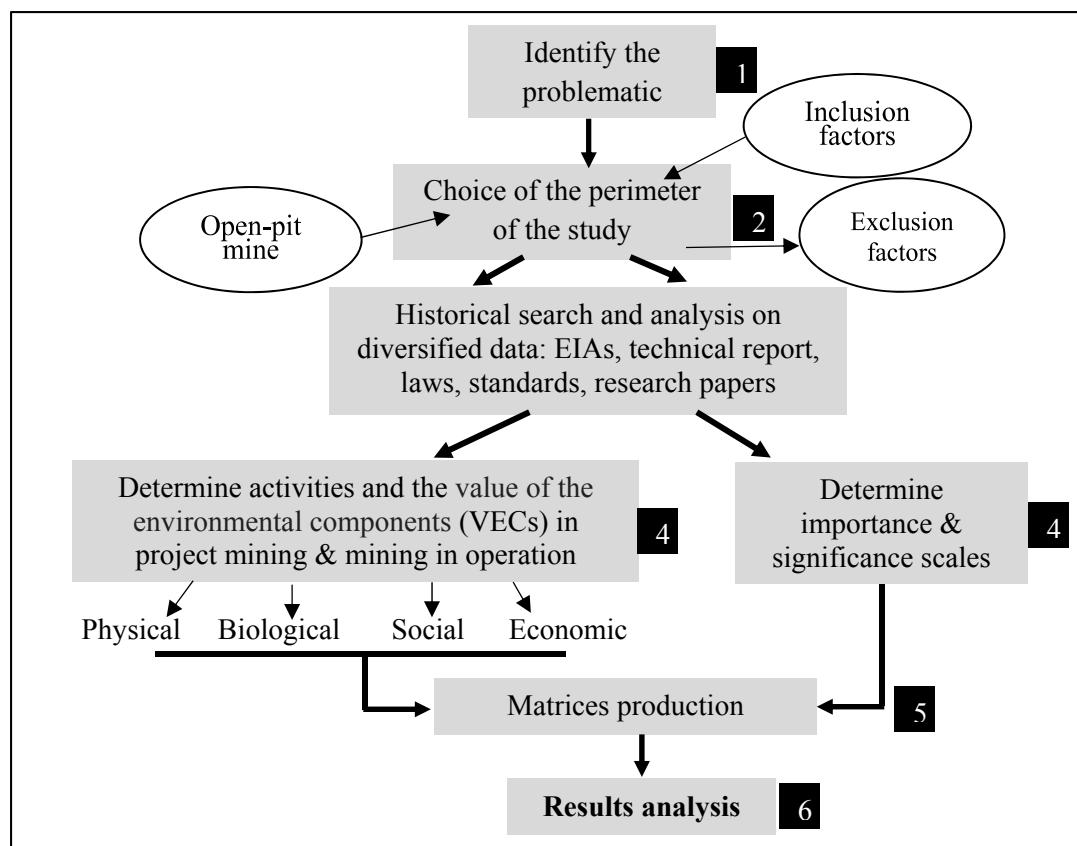


Figure 4.2 Description of the work methodology

After, a sensitivity analysis is done to compare the results.

Tableau 4.1 Summary of the EIA or public hearing reports studied

	<b>EIA or Public hearing reports</b>	<b>References</b>
1	Sisson mine project	New Brunswick (2015)
2	Apatite mine	BAPE (2013)
3	Coal mine	Alberta government (2012)
4	Kitsault Mine	Agence canadienne d'évaluation environnementale (2013); Amec Foster Wheeler (2012)
5	Akasaba west project mine	WSP Global (2015)

Tableau 4.1 (suite)

	<b>EIA or Public hearing reports</b>	<b>References</b>
6	Whabouchi mine	Nemaska lithium et Agence canadienne d'évaluation environnementale (2013)
7	Beaver dam mine	Agence canadienne d'évaluation environnementale et Atlantique Gold Corporation (2017)
8	Niocan project mine	Roche ltée (2000)
9	Arnaud inc. project mine	Roche ltée (2012)
10	Apatite project mine in Paul lake	Genivar (2013)
11	Bloom Lake Iron Mine	Genivar (2006)

### **Study of area**

This work considered the review of 11 open pit mines across Canadian provinces. Excluding the inclusion and exclusion factors of this research, with their approved public hearing reports and environmental compliance certificates.

### **EIA and Ni 43–101 : What is the Difference ?**

The Canadian government designates a mine as any set of surface or underground infrastructure intended for the extraction of minerals (Gouvernement du Québec, 2011; Parcs, 2012; Québec, 2017). This activity is subject to several laws, regulations, standards and requires any manager not only to submit an EIA but also a technical document that serves as a national instrument called Ni 43–101 (Autorité des marchés financiers, 2016). It is a technical report that includes in an all-round form, all material scientific, mineral-physical aspects and technical data concerning the mining project. It is about to provide specific details concerning mineral exploration, development, and production activities on a mining area by a qualified person. This technical report, which is intended for the investing public and its advisors, may contain information similar to that are used in an EIA, but it remains simplified on environmental issues of this activity. The reader should note that the

Ni 43–101 reports have only been considered partially. According to Holling (1978), L. Rist, Felton, Samuelsson, Sandström, et Rosvall (2013) all the interactions of any ecosystem are not always well or sufficiently understood by the available data. But, as the decisions or predictions must be made, it would, therefore, be wise to make an up-to-date assessment of the potential impacts on an OPM and its operating parameters before continuing this study.

### **Activities and the VECs in Project Mining and Mining in Operation**

The variables retained are: the mining activities from project to the termination and the environmental factors considered in the literature consulted on OPMs. There is a list below in table 1 and 2. Data are collected in gray literature, scientific databases, available EIAs, few Ni 43–101, scientific articles, organizational or government documents and other reports or briefs. The cause-and-effect relationships between actions and VECs have been studied through EIAs reports and in-depth reports to attain and recapitulate the impacts close to the ground situation. See the Tableau A V-1: Summary of environmental factors or valued components of the environment (VCE) at the Annexe V.

Tableau 4.2 Summary of activities or mining operations in an OPM

<b>Site preparation &amp; Construction</b>	<b>Operation &amp; Maintenance</b>	<b>Closure &amp; rehabilitation of the operated site</b>
Observation and mapping of the terrain	Drilling and blasting rock	Demolition of infrastructure
Exploration, sampling and sampling of geological and geotechnical data	Storing blasting products	Integrity of works (supervision and maintenance work)
Assessment of the potential for structural instability	Crushing and grinding	Environmental monitoring
Mineral Resource Estimate	Washing	Rehabilitation of the land
Completion of other related studies such as EIA with assessment of the cost of restoration	Sieve and particle size distribution if applicable	Monitoring the quality of the effluent

Tableau 4.2 (suite)

<b>Site preparation &amp; Construction</b>	<b>Operation &amp; Maintenance</b>	<b>Closure &amp; rehabilitation of the operated site</b>
Clearing, stripping, weeding, cleaning	Collection	Monitoring the quality of groundwater
Drying and leveling	Transport of chemicals	General management of residues
Trench opening at the deposit	Concentration and processing of ore	Agronomic monitoring
Management of topsoil, till and waste rock	Evacuation of water and effluents from the open pit	
Drilling and blasting / felling of rock	Ore transport	
Disposal of water from the settling pond (if it existed)	Management and handling of ore in terminal phase	
Changes to watercourses and wetlands (if applicable)	Management of waste rock and tailings	
Construction of site roads and installation of surface lighting, including lighting	Surface water management	
Slope construction	Management of petroleum products	
Installation and construction of infrastructures	Fuel warehouse	
Pit design (geological, economic, financial and operational considerations)	Fire and management	
Excavation of the catch basin and settling basin	Slope failure	
Installation of on-site lighting	Spills of fuel or other spills	
Warehouse for blasting / slaughtering products	Site maintenance, repairs and installation of lighting	

Tableau 4.3 (suite)

Site preparation & Construction	Operation & Maintenance	Closure & rehabilitation of the operated site
Lighting of transport routes	Failure of the catch basin or settling basin	
Operations involving the use of mobile equipment	Environmental monitoring at predetermined intervals	

### Magnitude and Significance Calculation

Several matrices have been developed for different specific applications and among them, Leopold's matrix is the most general with a wider application. A matrix provides a multi-criteria assessment of the possible impacts of an organization's activities in the project stage. Also, matrix tool like Leopold's can take into account both quantitative and qualitative data that correspond to the values found and this is the exact context of environmental studies. In addition, another purpose of this paper is to generate a matrix of OPM in operation.

Tableau 4.3 Summary table of the determination of the significance value of an environmental impact

Weight (W)	Magnitude (M) ou severity	W	Time (T)	W	Probability (P)	Corresponding weight	Significance
1–3	Negligible	1	Punctual	1	Rare	<b>M+T+P = I</b> <b>NB: if I &gt; 10</b> then the weighting of I remains <b>10</b>	Negligible
4–6	Low	2	Medium	2	Likely		Low
7–8	Median	3	Long term	3	Effective		Medium
9–10	Strong or irreversible	4	Irreversible				Strong

Under the quotation system indicated below, the magnitude and significance of each impact are respectively calculated. After, some statement of activities and environmental factors are also calculated. According to logic matrices development and the qualitative analysis, the

weighting here varies from 1 to 10 both for the magnitude and significance of the impacts. Some values can go beyond 10 but, when this maximum is reached, it's maintained at 10.

### **4.3 Analysis of results**

The objective of this extensive work is to present an enhanced dynamic matrix system to facilitates a systemic evaluation of environmental impacts in any OPM. It also aims to observe the variability in the parameters related to the risks. These approaches reduce the following-up monitorings' weaknesses and allow managers to assess the efficiency of mitigation measures. As the research issue is also to minimize negatives risks on OPMs sites, this research outcomes point out all the environmental factors sensitive to the variations over time of mining operations as well as the variability of the parameters themselves (from project to the operating step).

#### **4.3.1 Recapitulation of Potential Environmental Risks and Activities in an OPM**

The summary of mining activities or operations in an OPM change from one state to another. In the table (*Tableau*) A V-1 are listed the mining activities from the site preparation to the closure and rehabilitation of the mined ore site. But as it is shown in table 4.3, these activities vary once the operations are executed. There are more than 4 activities in addition to those listed in an EIA. After preparation and construction, the operations, increase to thirteen once the mine is in operation. It should be also noted that the volume of an operation becomes larger after getting the permission notice. In the same way, there are fluctuations in environmental parameters from a mining project to a mine in operation. The table 4.1, has shown previously some elements of the major groups of factors known as physical, biological and human, which have increased tenfold in several and different sub-elements. Indeed, the predictions may necessitate reviews, additions, derivatives or duplications to follow closely. See the next tableau 4.4 (*Tableau* A V-2 in this document) at the Annexe V called: Fluctuations in the activities listed at the EIA elaboration and post-EIA

#### 4.3.2 Qualitative and quantitative data from matrix of symbol values or numerical matrix

This section summarizes the project phase and operation phase impacts of the physical, biological, and social-economic-cultural components in an OPM. A quick summary shows that the data vary from a matrix at EIA stage to a post-EIA status not only at the activity or the affected environmental factors level but also quantitatively and qualitatively. These analyses assume that activities or environmental components could change speedily, promptly or briefly over time and between processes. Two type of matrices are developed: symbolic and numeric. The symbolic matrix cannot be considered as the numerical matrix. His data remain qualitative and the conclusions are approximate since the majority is retained. For its own part, the numerical matrix provides with much greater detail on the: 1) need to make environmental monitoring more dynamic and therefore interactive; 2) ecological significance of such effects ; 3) emphasis on environmental factors and the mining system. These, on the basis of regular updates of the evolution of the environmental risks during the lifetime of the mine.

#### *Qualitative Data results from the Matrices with Symbol values*

Tableau 4.4 Qualitative data results on an open-pit mine (OPM) project

<b>Impact typology</b>	Positive <i>but negligible</i>	<i>Minor</i> positive	Positive <i>average</i>	<i>Major</i> positive	Negative <i>but negligible</i>	<i>Minor</i> negative	Negative <i>average</i>	<i>Major</i> negative
<b>Synthesis</b>	4	14	53	145	32	162	329	323

Tableau 4.5 Qualitative data results on post-EIA of an OPM

<b>Impact typology</b>	Positive <i>but negligible</i>	<i>Minor</i> positive	Positive <i>average</i>	<i>Major</i> positive	Negative <i>but negligible</i>	<i>Minor</i> negative	Negative <i>average</i>
<b>Synthesis</b>	0	28	37	75	101	123	533

Here above, the synthesis of the results from the matrix of symbol values in table 4.4 and table 4.5, demonstrates clearly the negative environmental risk activity that mining represents even if there is a considerable rate of positive impacts. In addition of this outcome from the qualitative data, it is interesting to point out in one hand the impact of activities on each part of environment components and in the second hand, the incidence of all mining activities during the mines' life cycle.

#### ***Quantitative data results from the matrices with the numerical values***

In each impact cell of the numerical matrix, there are two numbers above and below the diagonal of each cell, respectively, indicating magnitude (from 1 to 10) and significance of impact (from 1 to 10). Negative values do not always appear with the symbol (-) but the cell is always colored whilst the positive cells are colorless. The calculation is simple and is limited to the sum of the values depending on the activities on the line of each factor of the affected environment. Therefore, the magnitude weight of «construction of site roads and installation of surface lighting» impact on geomorphological resource equals: (-)7 [7 (+ 0) = (-)7]. The significance weight of «construction of site roads and installation of surface lighting» impact on geomorphological resource equals: (-)10 : [10 + 0 = (-)10]. It is the same thing about positive impacts but they always appear in unstained cell and since they are positive the symbol in front of their numbers is always the (+) even if the sign does not appear in front of the number.





### *Summary of matrices analysis*

Here, the results report the general degree of impacts of project phase on different parameters, which are already known in the scientific literature, but not in this kind of numerical and symbolic details, for a total of six assessment table matrices.

Tableau 4.6 Environmental mining assessment scores on the project phase and post-EIA phase

<b>Project phase</b>									
	PHYSICAL				BIOLOGY			HUMAN	
	Geomorphological	Soil	Air	Acoustic	Vegetal	Wild-life	Water	Economic	Social
<b>Magnitude -</b>	85	229	354	248	235	639	592	107	414
<b>Significance -</b>	131	345	551	384	355	721	949	149	554
<b>Magnitude +</b>	10	30	9	7	39	88	58	130	872
<b>Significance +</b>	12	44	17	13	44	101	91	181	1177
<b>Post-EIA phase</b>									
<b>Magnitude -</b>	99	499	980	472	137	478	898	99	1389
<b>Significance -</b>	134	134	1267	623	179	663	1180	111	1728
<b>Magnitude +</b>	15	28	18	2	32	109	94	110	1367
<b>Significance +</b>	19	41	30	3	53	135	254	152	1452

Legend:  Negatives values ;  Positives values

The table 4.6 lists two elements of the environmental factors negative scores for the project phase with the post-EIA phase in both magnitude and significance terms of general parameters.

### *Scores and Sensitivity Analysis: Project and Post-EIA phases*

This figure 4.3 is a table built in Microsoft excel to perform sensitivity analysis. See the overview of the environmental components family score at the Annexe VI.

The analysis of the numerical matrix at the post EIA stage highlights the high rate of negative risks on all physical, biological and human environmental factors. But, even in terms of physical and human factors, there is a growing difference between the magnitude and significance of risks, as from the project phase to the operational stage. However, the risks related to the biological factors from the beginning of the project to the operation phase maintain a regular, high rate but almost invariant as presented in the precedent Table 4.7.

Tableau 4.7 Summary of magnitude and significance of negative risks

	PHYSICAL		BIOLOGY		HUMAN	
	Project phase	Operation phase	Project phase	Operation phase	Project phase	Operation phase
Magnitude of negatives impacts score	-1388	-1578	-1466	-1513	-521	-1488
Significance of negatives impacts score	-1411	-2158	-2025	-2022	-703	-1839

The figure 4.4 below describes how negative risks appear to be less important in EIA development but take on greater importance or are more affected once the mine is in operation. This is a normal phenomenon that needs the attention of stakeholders, especially since this step is longer than the project phase.

By observing the results, we notice that the negative risks, even if their weighting remain very high, the fact is that effect of the positive economic impacts is higher. Geomorphological, soil, air, acoustic, vegetal, wildlife, water, economic and social parameters are considered in the sensitivity analyses in order to gain insight into the proposed hypothesis. In order to simplify the reading, these environmental factors are represented by numbers 1 through 9 in the order as shown in the table 4.8.

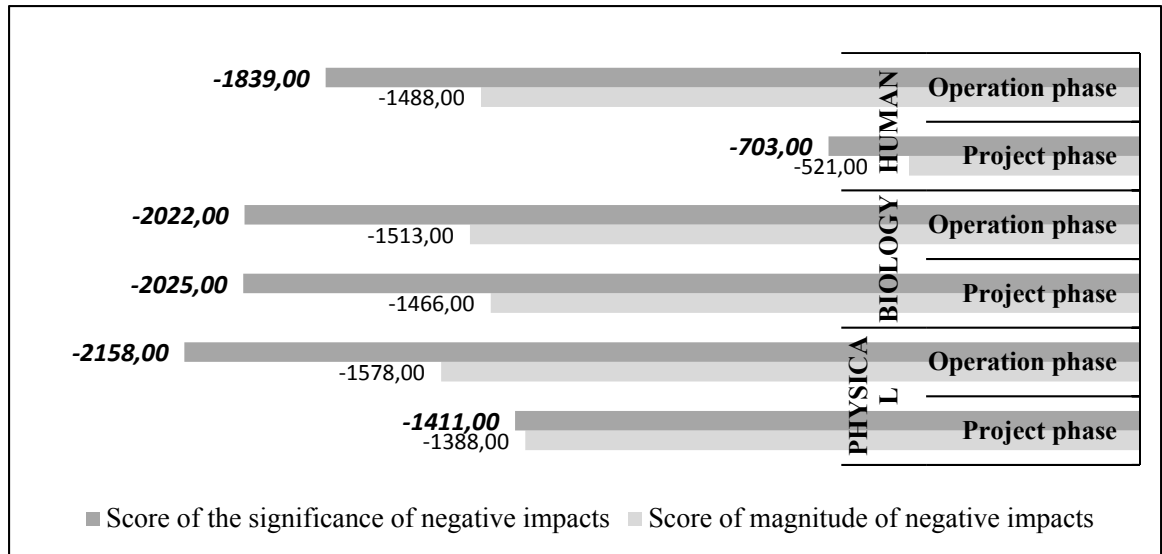


Figure 4.3 Plotted results of comparison importance level between negatives environmental risks

Tableau 4.8 Environmental factors parameters in order taken into account in the sensitivity analysis

1	2	3	4	5	6	7	8	9
PHYSICAL				BIOLOGY			HUMAN	
Geomorphological	Soil	Air	Acoustic	Vegetal	Wildlife	Water	Economic	Social

***Disparities between the Level of Magnitude and Importance of Risks Observed***

The results of these sensitivity analyses shown in figure 4.5 show a considerable disparity between the impacts weight on the VECs. These disparities between the level of magnitude and significance of environmental risks after summation of impacts scores led to determine adverse or unavoidable impacts and the corresponding parameters to follow-up. Indeed, by fluctuating over time, some variability parameters are highlighted and must be monitored. The figures expose also the magnitude and the significance of the negatives risks especially, over time which joins the previous deductions. Soil, air, acoustic, wildlife, water and social are these factors subject to variations to follow closely.

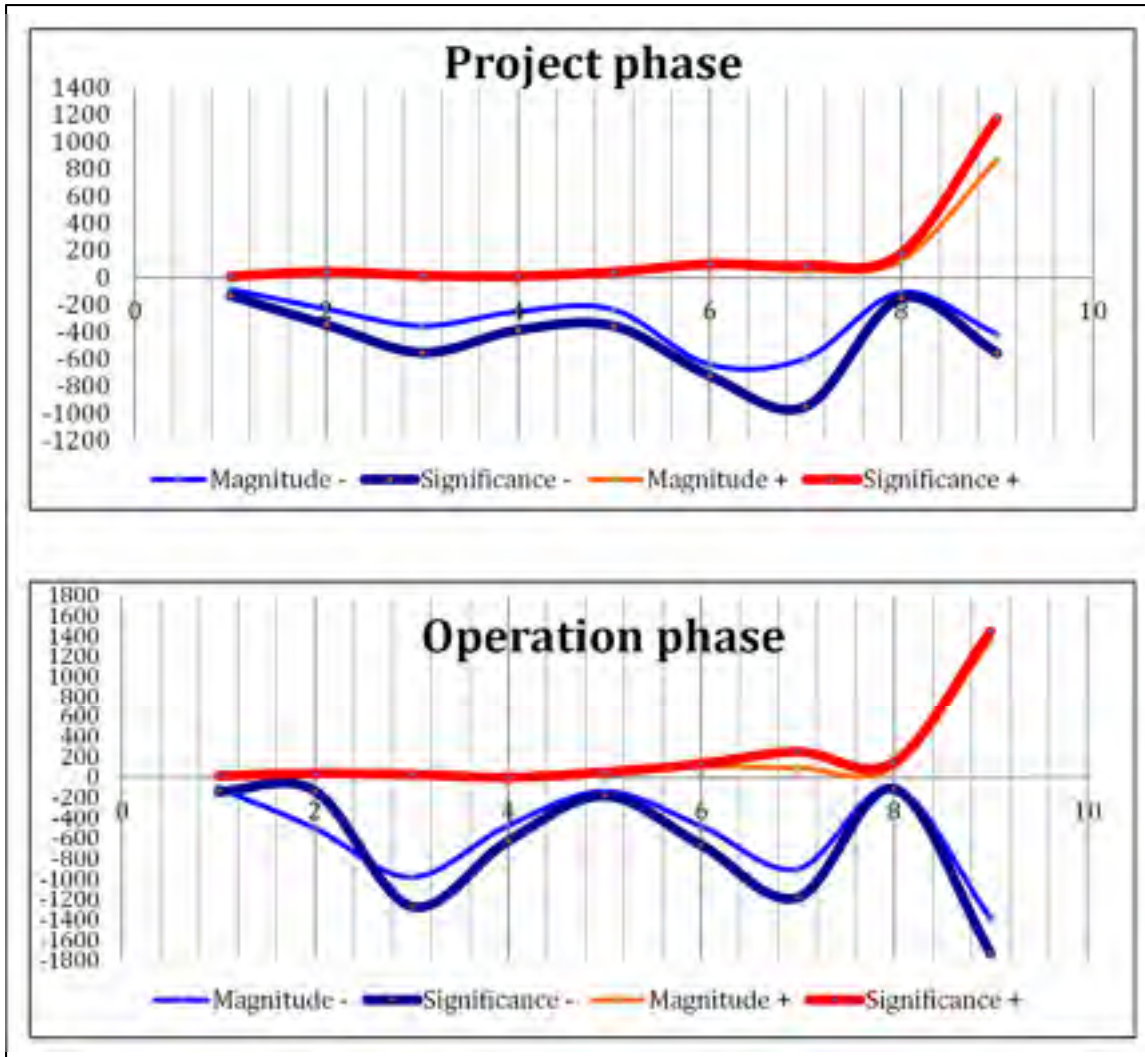


Figure 4.4 Sensitivity analysis: magnitude and significance risks evolution from project to operation phase depending on environmental factors

Positive impacts do not need to be mentioned because they are not sources of harm to the ecosystem. But it remains necessary to emphasize that there are positive values because this investigation from the beginning takes into account the principles of wastewater management. A principle that any mine manager or other industrial infrastructure must have. However, the apparent invariability of factors 1, 5 and 8 (geomorphology, flora and the human) mean something else. They demonstrate their dependence on the other environmental factors.

#### 4.4 Discussion

This paper brings round a new execution methodology mode of the assessment process to take appropriate mitigation measures for a responsible environmental management in mining. The work proposes a technical approach with a major review process (of risks, VECs) useful for a better decision-making process for both academicians and practitioners. This, since the alert is put forward by some authors like MacKinnon et al. (2018) on the need to reconcile environmental management to a more adapted scientific methodology. And furthermore, to better ensure the EIA procedure to dynamic simulation technique, the research gives three specific contributions.

##### **Evolution, Extent, Significance, and Magnitude Data**

After collecting OPMs that met the criteria defined (exclusion and inclusion) a synthesis of the environmental parameters in different scientific languages has been made. This harmonization led to the reduction of repetitions, to a systemic summary of the considered factors in the mining industry and an appropriate outreach to all stakeholders. At the end of this first exercise, 58 environmental factors have been listed as shown in table 1 against 65 factors to the phase of mining operations. This is followed by a summary of activities or operations conducted for these mining activities in the state of exploration, project, construction, operation, and closure of the mine. 42 different activities are retained in the matrices of the operation phase compared to 50 in the project phase because that includes the exploratory and construction steps (see table 4.3). And the probabilities of negative or positive impacts spread across 2900 cells at the project phase (50 activities x 58 factors) and 2730 at the operational phase (42 activities x 65 factors). Then, the obtained impacts are individually (according to each activity) or sequentially, numerically, qualitatively and therefore globally also (due to aggravating factors). But, even if the negative risks are greater than the positive impacts, the 2900 and 2730 probabilities respectively do not make all impacts as shown the sensitivity analyze (figure 4.5). Finally, the matrices highlight: 1) the potential environmental risks (from negligible to major); 2) the development or evolution of

risks over time between the phases; 3) the interaction of risks with the other components of the system; 4) and their amplitude followed by their significance on every affected environmental factors.

### **Mitigation measures strategies: horizontal and vertical data**

The results show the incidence of mining activities during the lifetime of the mine. In order to remove or reduce negative environmental impacts, mitigation measures are identified right from the project conception. There are two known types: suppression and reduction measures at the source. In general, the suppression measures correspond to the alternative of eliminating impacts at the source (Baard, 2014; Gouvernement du Québec, 2018). They require a revision of the initial project by reconsidering the aspects of development and exploitation. This in order to eliminate the negative impacts on the natural environment or the species exposed. While if a negative impact cannot be removed, the reduction measures serve to limit the influence of the anticipated negative impacts. They may apply from time to time from the design of the project, but during the construction, operation and maintenance phases. In this work, due to the observed changes and fluctuations in the weight of the impacts, an optimal application of mitigation measures is essential before the project construction and during the operations. However, such a measure will depend on the temporal behavior of the risks and the environmental factors concerned. An approach facilitated in this paper by computing horizontally and vertically the impacts scores. When the obtained data are combined vertically how dangerous is each activity on each VECs and the stakeholders can choose another way to make this operation if it remains essential. When it is horizontally, the manager is able to better measure the sensitivity of environmental factors over the lifetime of the mine. By taking the example of a physical factor on noise pollution, major negative impacts remain throughout the life of the mine and will make the environment unbearable if no mitigation or suppression is taken. Moreover, as the mine get older, a concentration of negative risks is more observed. These are the aspects that should challenge the parties involved in readjusting the environmental management of mining to

increase the frequency of environmental monitoring so as to closely monitor sensitive factors and subject to strong and dangerous fluctuations.

### **Environmental Mining Management and Dynamic Monitoring Options**

The ability to provide values close to the realities of the environment over time is a particularly important aspect that directs the players in the environmental management of mining towards the integration of dynamics. Indeed, these matrices ensure a temporal risks representation, from the mining project to, the mine in operation. This approach can serve as a bridge to dynamic management and the use of dynamic simulation (DSi) in environmental procedures as analyzed by M. S. Lagnika et al. (2017) by creating dynamics matrices for an adaptive management. The generated risk sheet can serve also as a basic reference for managers and users of EIA projects for mining projects from now on and within the framework of the environmental management.

The variations observed between the two phases invite to the importance of being careful about environmental factors changes or transformations or behavior over time. Also, when an environment component experiences a series of negatives impacts as undergo the security, noise pollution, water, effluent quality, flora, etc. evidence of a regular environmental monitoring program with a rigorous application is a visible recommendation to adopt.

## **4.5 Conclusion**

Properly managing environmental risks is at the top of many actors in the mining sectors' agendas. However, the process of sorting measures to mitigate or prevent risks and the monitoring program are most of the time structured in theory but often unstructured during the production. That is also reflected in this academic research literature performed.

Also, even if there are more than hundred or thousand EIA studies realized in the world in mining, there are also more than hundred methodologies used for. Yet, a harmonization of proceedings seems to be a meaningful way to recommend. To improve the environmental performance of mines and the performance of operations, this work help practitioners to invest themselves in adaptive environmental assessment and management as advocated

Holling (1978) by creating models of monitoring matrices. Establishment of a matrix as a primary tool for access clearance the negative, positive or negligible environmental risks at the project (with EIA) and the operation (post-EIA) phases, required elements from several orders to reflect the reality. So, by dynamic symbolic manipulations and numerical solving or inferences, this work is a contribution to a useful production information system for OPMs here like elsewhere and allowed to make an in-depth prevention of impacts. These dynamic matrices should be required hereafter in the environmental monitoring program and integrated into the mining plan to improve mitigation measures over time. And, systemically by a reverse engineering to obtain values reflecting approximately the reality of the: evolution, extent, significance, and magnitude incurred during the mining's lifecycle.

As MacKinnon (2017) maintain that the global environment assessment (EA) enterprise is to fulfill the purpose to contribute to a sustainable pattern of development by protecting VECs, then, researchers and practitioners must adopt a collaborative, participatory, and scientifically rigorous approach to conduct EAs.

### **Acknowledgment**

The Ecole de technologie supérieure (ETS) supported this work via the following programs: Experimental station of pilot processes in the environment (STEPPE-ÉTS) and research officers. We also thank all the reviewers for their constructive comments.

### **Appendices**

All appendices A, B and C are in the appendix section at the end of the present document.



## CHAPITRE 5

### ARTICLE 2 : MODELING OR DYNAMIC SIMULATION: A TOOL FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN MINING?

S. B. Mondoukpè Lagnika <sup>a</sup>, Robert Hausler <sup>b</sup>, Mathias Glaus <sup>c</sup>

<sup>a, b, c</sup> Station expérimentale des procédés pilotes en environnement (STEPPE); Department of construction engineering; École de technologie supérieure, Canada

Article publié dans «Journal of Integrative Environmental Sciences» de Taylor & Francis  
Vol.14, n° 1, Février 2017

#### Résumé

L'effervescence, due aux prix intéressants sur le marché des minéraux et de la demande continue à la hausse, maintient un intérêt accru pour les investisseurs dans l'exploitation minière. Cependant, c'est un secteur particulièrement confronté à de nombreux impacts environnementaux négatifs, techniques et environnementaux auxquels s'ajoute la réunion des objectifs financiers et de production. Néanmoins, en parallèle, la gestion des risques de ces activités d'extraction sur l'environnement – à l'ère où le niveau de sensibilisation de la société à l'équilibre écologique a évolué – continue de nourrir les discussions et les interventions. Par conséquent, il devient inévitable de gérer plus efficacement les facteurs environnementaux autour des mines. Cette étude vise à proposer l'intégration d'outils de gestion environnementale basés sur la simulation dynamique (SiD) pour l'exploitation minière. Cette recherche s'articule autour de quatre thèmes principaux : 1) la dynamique d'un système à fosse ouverte, 2) la gestion de ses effets environnementaux, 3) les outils de gestion environnementale (GE) à la disposition des gestionnaires et 4) la proposition de GE par les systèmes dynamiques (SD). Les résultats montrent que les défis sont nombreux et que le volume des approches SD dans l'industrie minière est en constante augmentation, même si seulement quelques-uns sont orientés vers la GE. Certaines approches de SD avec une efficacité prouvée sur quelques mines à ciel ouvert montrent une nouvelle avenue de recherche à approfondir.

**Mots-clés :** simulation dynamique; systèmes; mines à ciel ouvert; gestion de l'environnement; impacts.

### **Abstract**

The buoyancy of the minerals market, due to price and demand continually rising, maintains an increased interest for investors in mining. However, it is a sector particularly facing many negative environmental impacts, technical and environmental conditions to which are added the meeting of financial and production goals. Nevertheless in lockstep together, risk management of these extractive activities on environment – in this age where the society's level of awareness in ecological balance has evolved – continues to fuel discussions and interventions. Therefore, it becomes unavoidable to manage more effectively the environmental factors around mines. This study aims to propose the integration of environmental management (EM) tools based on dynamic simulation (DS) for mining.

This research is structured in four main topics: (1) the dynamics of open-pits system, (2) the management of their environmental effects, (3) the EM tools at the disposal of managers and (4) the proposed EM by DS. The results show that the challenges are numerous and the volume of DS approaches in mining is constantly growing, even if only few are directed towards EM. Some approaches of DS in a few open-pits with the proven effectiveness, show a new opportunity to investigate.

**Keywords:** dynamics simulation; systems; open-pits; environmental management; impacts.

## **5.1 Introduction**

Environmental management (EM) has become an important preoccupation, and industries for which the scientific community strives to develop appropriate tools knowing that the reduction of environmental risks (ERs) requires the integration of various parameters. In recent years, many studies integrated modelling tools for the management of their diversified business sectors. Indeed, for Hines et al. (2011), simulation models can be useful in many

areas of management science, but also often expensive, time consuming, and challenging to develop. In fact, modelling has gradually evolved from a simplified graphical representation into a dynamic digital representation where users monitor their systems, directly observing operations or dynamic functioning of the components that constitute operations. The interaction stemming from socio-economic development and technology contributed to advancements in technology, namely the development of increasingly-powerful tools transforming static modelling into dynamic modelling. However, advancements in database management with computer/software engineering now greatly affect simulation processes, artificial intelligence and the development of support tools. The mining industry is one that stands out with respect to a range of applications where the EM process is still only partially addressed. The mining sector is an important contributor to economic development.

This article includes a literature on dynamic simulation (DS), its application for the mining industry and methods of management of environmental problems and risks upon integrated implementation. The present paper also analyses the progress aspects of simulation digital existing tools and the benefits of its use for EM activities. It is also a critical analysis of the existing data to help in understanding EM practices related to mining engineering, to highlight the limitations of current tools and the importance of simulation software such as Vensim. This contribution will lead to the development of key solutions in the ever-changing area of mining environmental management (MEM) research.

To achieve this, the remainder of the document has been organized into seven sections. The organization of this research and objective of the study are described in Sections 5.2.1 and 5.2.2. Sections 5.3 and 5.4 provide a detailed overview of the research methodology and materials in academic and mining industry perspectives with known and emerging ERs. Section 5.5 focuses on the differences on intermixed terms taken into account in modelling and simulation. Then, main results obtain using those methods are summarized in Section 5.6. In Section 5.7, a non-exhaustive list of tools currently used in EM, the progressive integration of DS in EM and the challenges of MEM are discussed. Then, the critical assessments of management approaches have generated other questions on links between MEM and DS before concluding in Section 5.8. Far from being exhaustive, this work intends

to provide an overview of the application of this technology in many industries including mining and to point out his absence in MEM.

### Organization of research

For each basic study with respect to the required data, keyword groups or semantic equivalents for critical review are integrated in Table 5.1.

Tableau 5.1 Keywords used for information research and related objectives

Keywords used	Objectives
(open-pit mining) + simulation + management	Know the history and evolution of modelling and dynamic simulation in open-pits mines (OPMs) practices
(open-pit mining) + (dynamic modelisation) + management	
(dynamic simulation) + (environmental practices)	Know the existence or not of simulation as an environmental management tool
(mining NOT data) + simulation + (risks management) / (environmental risks)	Know the existence or not of simulation as a tool in environmental management in mining industry

Next, this critical review of literature was organized in different stages as shown in the Figure 5.1 below.

Contributions from the various chosen publications show a particular pattern of dynamic systems usage linked to one of the many existing issues in the mining industry. For example, the contributions can be divided in three categories: (1) financial profitability as dominant model within covered scientific publications; (2) production optimization or the planning related to extraction procedures; and, (3) as aid in decision-making or other solutions related to risks. Without a doubt, this research activity has contributed in: (1) organizing, viewing, analyzing and summarizing important elements of the research on DS or modelling; (2) showing the evolution of software for this digital approach within the mining industry; and (3) highlighting potential links with EM.

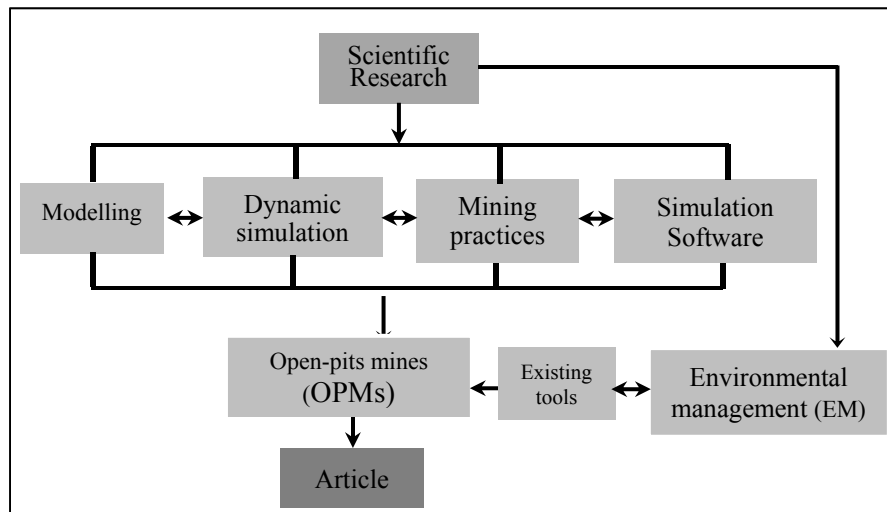


Figure 5.1 Literature review structure in the completion of article

DS is synonymous with dynamic modelling for many scientists as detailed later in Section 5.5.1, however, throughout this text, the term ‘DS’ will be used.

### Research objectives

The objectives of this research are to:

1. summarize and discuss the evolution of DS and software in the mining industry; and
2. promote research on DS as an EM tool in the mining industry.

## 5.2 Research methodology

### Process and materials

Nine databases have been considered for the collection of a substantial volume of articles: Compendex & Inspec, ScienceDirect, Scientific.net, Taylor & Francis online, Wiley & Son, IEEEExplore, Springer, Hindawi and Google scholar. The use of digital simulation in management approaches, optimization schemes, existing and emerging issues whether unresolved or resolved in mine management are analyzed during this research. Furthermore,

the volume of databases was increased upon review of selected bibliographies of the articles, leading to the collection of relevant peer-review articles mainly on open-pit mines (OPMs).

### **Type of mines**

Different mining extraction practices determining various types of mines, exist worldwide which are define by circumstances and elements types (Gratzfeld, 2004). According to Samimi Namin, Shahriar, et Bascetin (2011), several factors including: economic, spatial characteristics of deposits, geological and hydrological conditions, geotechnical properties, technological and environmental aspects, are considered in determining the mode of extraction. They are generally of the following two categories: OPMs and underground mines. OPMs allow the extraction of minerals near surfaces, while underground mining are extractions of deposits below the surface. In addition, the latter requires special facilities: a network of wells and galleries linking to the surface and allowing the circulation of personnel and transportation of equipment and ore. All such excavations are equipped by supply systems that need to be effective regarding ventilation, water, electricity and compressed air (Armstrong & Menon, 2000).

These extraction methods are similar everywhere despite the differences in work techniques and ore types. However, this research mainly focuses on OPMs operations and related environmental risks due to their high number in comparison to underground mines (NIOSH, 2011).

### **5.3 Mining industry and ERs**

M. S. Lagnika (2009) defines the risk as an uncertain occurrence and, if present, affected entities bearing the risk. Thus, as frequency and effects characterize the risk, any activity can lead to risks of external or internal nature. Among others, mining corporations have their environmental impacts analyzed (Bhatasara, 2013; M. S. Lagnika, 2004; Nadeau et al., 2013; Panov et al., 2011). Mining sector as an important contributor to economic development

around the world is favourably considered. It generates significant economic benefits, facilitates the design of numerous products as well as the transformation or processing of a variety of industrial products into useful products. The Canadian government (2000) recognizes the importance of metals and the mining industry for the economy (income) and for the population (employment). But, the negative impacts associated with these activities are considerable.

Highlighting aspects of extracting non-renewable natural resources by various industrial operations, Godrej et Forbes (2012), have again confirmed ERs associated with the mining industry. It is an industry in which coexist several subsystems such as: production, technology, environment, human resources and markets. And these impacts on natural elements belonging to their biophysical, geological, geographical or social environments in turn become sources of ERs. Underground or open-pit mines are regularly subject to anthropological and technological influences as evidenced when also considering these characteristics (Dhillon, 2009; Donoghue, 2004; Radosavljević & Radosavljević, 2009; Ramani, 1995).

There were numerous ERs identified in the literature associated with the operation of OPMs: loss of soil fertility for agriculture, air pollution, noise, vibrations, waste-water discharge, groundwater destabilization, wildlife destabilization, geomorphologic changes, soil and flora changes, soil and vegetation contamination from dust (soluble and insoluble) and water acidification (Agbo & Honkpehedji, 2009; Křibeka et al., 2014; M. S. Lagnika, 2004). Moreover, the type of ore and the geological formation coupled to the various mining activities (digs, sampling, spraying, drilling and blasting) and enrichment of deposits such as gold (with mercury, cyanidation, etc.) are also other serious sources of contaminant emissions (MAC, 2010; NMA, 2010). Thus, impacts from the mining industry on the environment, health and safety, which are considerable, further induce scientific research (Nadeau et al., 2013). There are still lacks however, in information related to the different risks, especially with those emerging risks highlighted in the (OIT, 2010) report which increase the uncertainty for industrial operations to master. In addition, high-tech equipment, including biotechnology equipment, is also identified as a contributor to numerous emerging risks like contamination by fine particles size fraction (Csavina et al., 2011; Donkor et al.,

2005; Muezzinog'lu, 2003; Paruchuri et al., 2010). And with this increase of such environmental risks, numerous interventions and ideas have been developed all over the world on optimal design of mine structures and sustainability into the design process for example (Fleurisson & Grenon, 2014; Kambani, 2003; Odell, 2004). Albeit the concept of prevention and the laws or regulations related to environmental management promote the reduction or elimination of risks at the source (Environmental compliance, 2003), an integration of various affected parameters such as current legislation, the economy, technologies, methods of extraction and EFs is still required. A management method which requires the development and use of appropriate tools (Gendron, 2004).

### **Environmental factors related to mining process**

Section 5.3 includes information related to the different ERs stemming from mining operations. However, following literature review, environmental factors linked to mining operations are important to note, which include human, economic, wildlife, floral, atmospheric, soil, hydrological, geomorphologic and geological factors. But it's important to mention that Canadian technical reports for mining commonly called *National instrument (Ni) 43 101* and the environmental impact assessments (EIAs) do not account for EFs in the same way (BAPE, 2013; ELAW, 2010; Genivar, 2008; Gervais, Roy, Thibault, Pednault, & Doucet, 2014; Redwood, 2013). Specific to mining, Ni 43–101 summarizes the core elements of the project before its completion and is comparable to the Joint Ore Reserves Committee Code in Australia. This report provides the preliminary economic analysis and all technical data except sensitive (e.g. mineral content) without further analysis of the environmental effects. That is why it differs from EIAs because he is the only one to evaluate in depth the effects of the operations on environmental factors by proposing mitigation measures. The following summary as shown in Table 5.2 lists the environmental parameters accounted for in the *Ni 43–101* reports, EIAs and other works systematically integrating sustainability aspects for mining projects. However contents of this outcome here serve in validating the link of such factors to mining operations.



Tableau 5.2 Summary of environmental factors related to mines and recognized in gray literature

	Environmental factors linked to OPMs											
	Biophysical profile	Flora and vegetation	Fauna	Climate	Geochemistry	Hydrogeology	Hydrology	Economy	Geology	Ground	Geotechnic	Social profile
<b>NI reports 43 101</b>	◆◆	◆◆	◆◆	◆	◆◆	◆	◆◆		◆◆			◆◆
<b>EIAs and 301 reports</b>	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆	◆◆

◆◆ Informations on this factor largely addressed and detailed; ◆ Informations on this factor slightly addressed; ■ Factor not accounted

### ER factors related to mining process

To prevent or manage any type of pollution, risk factors need to be understood by studying the cycle and interactions between system elements and then controlled. Recent work from Huisman et Wood (1974) describe the environment as a geological matrix and system represented by its topography and geomorphology comprising minerals with certain permeability properties. With water being essential for most living organisms, the system represents a natural receptacle of all flows above and below ground. With mining, purification process explained by Mballo (2012) during operations to obtain a higher concentration of the ore (e.g. copper), contaminants and reactions with subsoil materials (exposed to light and air) can change water composition risking to make it unusable. ERs thus become part of a dynamic where elements interact so as to negatively affect other elements, living organisms and compositions of the surrounding environment. That is the reason EM systems came into existence through various tools.

### Environmental management

EM is now widely applied as part of the planning and management of human activities in order to reduce EIs as well as negative social impacts. Boiral (2005) has explained how EM today is a major preoccupation for industrial organizations. According to Boiral (2005), their

legitimacy or economic survival are affected by external pressures and increasing regulatory requirements. Such organizations must now balance economic viability, social progress and environmental requirements (Labonne, 1999; Zeng et al., 2010). Two frequently-used systems have been highlighted here: EIAs and environmental management systems (EMSs) in the form internal environmental policies for organizations. However, these are not quite enough in solving existing environmental problems for the following reasons: (1) high number of issues or problems (2) intertwined or interlinked factors, and (3) processes according to Mermet, Billé, Leroy, Narcy, et Poux (2005) that negatively affect or destroy ecosystems are still ongoing.

#### **5.4 Introduction to dynamic systems and simulation**

##### **Modeling and simulation**

Apart from the fact that a model is a representation for an individual or element as an ideal, an example or a reference, there are several definitions with respect to lexicographical references.

In an epistemological context or reference however, Birou (1966) defines a model as ‘a physical or mathematical system, or rationalization representing essential structures of a reality’ and the fact of being able to dynamically reproduce and explain its functional aspects constitutes the modelling of phenomena or interactions within the system. But, Giraud et al. (1971) define modelling as ‘a process by which is established the model of a complex system to facilitate study of the system and to measure the effects of variations with respect to integrated elements.’ Then dynamic reproduction constitutes the confounding boundary between modelling and simulation but, in this paper, the concept of ‘modelling’ is equated with ‘simulation’.

According to Centeno (1996), simulation is more like an iterative process in which a model is designed, one or more scenarios are defined, temporal-space components are defined from zero time to infinity, results are analyzed, several experiments are performed, and so on. Such modelling considers the work environment and can apply for a variety of industrial

environments. Within expected logical and efficient syncing, with the organization of all mining operations being essential to production, such modelling requires interaction aspects between all elements of the system. This is because of these interactions and the number of elements involved (natural, technical, economic and social) that such a system, according to Sterman (2000) and Bérard (2009), is considered dynamic and complex. For example below, the Figure 5.2 illustrates a general model simulation of an OPM.

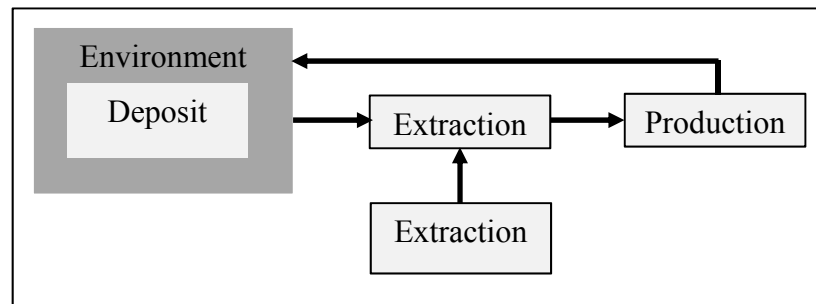


Figure 5.2 Extraction process model of an ore in its environment

### **Dynamic system**

According to Rosnay (1975), a system is a set of dynamically interactive elements organized to achieve a goal. The degree of complexity, the organization of relations between elements, the whole that all system components represent, and the interactions between elements are the properties of such a dynamic system (Poussin, 1987). Thus, the mining industry is a complex and dynamic system subject to changes where all components are in a perpetually interactive state or configuration with respect to each other. However such related complex issues of mines will not be discussed here. Csavina et al. (2011) recommended futures studies to better integrate modelling to predict environmental health risks associated with mining operations. So, DS could be a solution for more effective management of ERs in mining industry? The Figure 5.3 achieved by DS software represents a simple sequence of production of an ore to show the possibility.

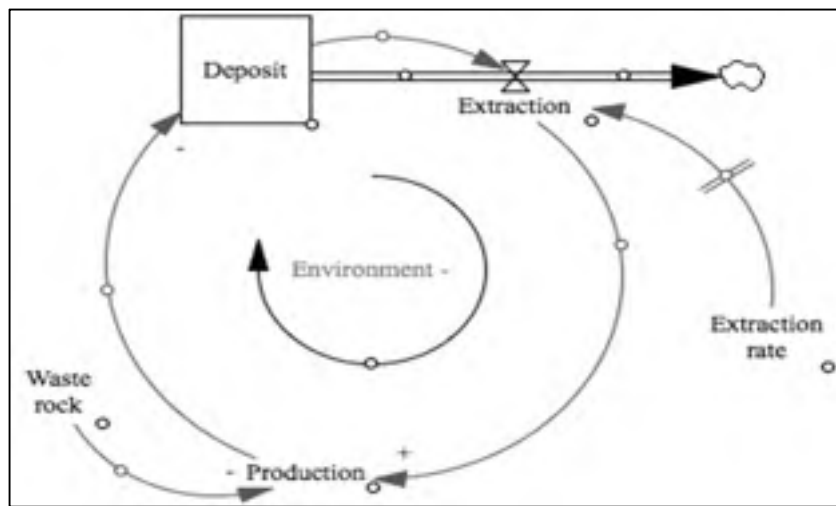


Figure 5.3 Single-sequence modelling of ore production using software

## 5.5 Results

### Challenge in MEM

There are numerous challenges varying in complexity often specific to each environment and method of extraction namely in industrial, independent/artisanal and semi-industrial mines. However in this research, only some of the general challenges of EM related to OPMs are presented in Table 5.3. These are: soil degradation, noise, vibrations, particle emissions (dust or contaminants), safety, waste management (various forms), water pollution and changes in flora and topography.

Tableau 5.3 Environmental challenges and issues covered by selected authors

Issues and challenges of MEM	Authors, publication year
Soil degradation	Butaré et Keita (2010); Dato et Flifli (2008); Edwards et al. (2013); Keita (2001); M. S. Lagnika (2004)
Noise and vibrations	Cloete, Zupanc, Burgess-Limerick, et Wallis (2012); M. S. Lagnika (2004); Qing-gui, Ye-jiao, Qi-hua, et Jian (2012); Samimi Namin et al. (2011)

Tableau 5.3 (suite)

Issues and challenges of MEM	Authors, publication year
Particles emissions (dust or contaminants)	Donkor et al. (2005); González-Carrasco, Velasquez-Lopez, Olivero-Verbel, et Pájaro-Castro (2011); Meech, Veiga, et Tromans (1998); Oyarzun, Cubas, Higuera, Lillo, et Llanos (2009)
Water pollution and waste water management	Csavina et al. (2011); Gratzfeld (2004); Hall (2013); Mballo (2012); Mirchi et al. (2012); Mousavi, Chavez, Ali, et Cabaniss (2011); Prikryl et al. (1999); Ravengai, Love, Mabvira-Meck, Musiwa, et Moyce (2005); Skousen et Vance (2003)
Safety	Samimi Namin <i>et al.</i> (2011) ; Lagnika (2004)
Changes in flora and topography	Samimi Namin <i>et al.</i> (2011) ; Genivar (2008)

Among these works, there have been attempts at utilizing DS and loop diagrams with the objective of resolving certain issues such as wastewater management (Prikryl et al., 1999) or safety (Li et al., 2013). However these attempts remain isolated solutions amongst all environmental issues to resolve.

### **Current EM tools and systems**

Section 4.4.3 covered a few of the EM systems commonly used in the mining industry. However, they are not the only tools or systems considered in this industry. Referring to covered publications from 1999 to 2014, five dominant systems and tools are generally used by managers: (1) EIAs; (2) EMSs; (3) life cycle assessments (LCAs); (4) environmental technical reports (ETNs); and, (5) environmental accounting (EA).

### ***Environmental impact assessments***

Defined as the study of the management of an activity (at the project stage) that can potentially affect the surrounding environment, it facilitates decision-making on project feasibility. It also serves as a set of guidelines for project planning for approved projects.

### ***Environmental management systems***

It is an internal control system for operations specific to the environment. It consists of internal EM policies regularly applied to activities and reinforced by effective communications on the risks to the public, stakeholders and employees at all levels with an objective of continuous improvement. Within most mining companies, EMSs are often used in addition to EIAs completed beforehand in order to demonstrate the use of green practices (Evangelinos et al., 2014).

### ***Environmental technical reports***

These technical reports vary according to publication context. Among them are mandatory publications, corporate discretionary and non-discretionary publications required for obtaining certain certifications or for other legal or contractual purposes. According to Sinding (1999), these publications do not always link to the environmental, social and economic aspects to address or solve, but more often contain content on compliance level or performance with respect to the management of social and economic aspects. Over time, this system adds a significant volume of publications with costs that are also significant to previous systems and tools.

### ***Life cycle assessments***

Assessments of impacts generated at various stages by the production of ore from its extraction stage to its procurement. Risk identification occurs from all impact zones (including input products, equipment used, etc.), with an evaluation and report on mitigation measures at each stage of production. The particular aspect of this system is that the data obtained increases with the complexity of the final product, and analyses are carried out individually for each finished product for every organization. Results are compiled in documents intended for stakeholders and increase the volume of publications within these organizations.

### ***Environmental accounting***

Refers to the identification of risks that are further described through cost analyses of incurred Ers. In addition to focusing on the satisfaction of stakeholders, absolute measurements of contaminant emissions and their financial impacts greatly affect decisions. With financial aspects being essential to the viability of mining companies, this system is consequently often used.

Evangelinos et al. (2014) identified 15 systems and tools available to mining industry managers, in an addition to a conclusive ‘eco-conscience’. Numerous EM techniques may be available, but aside from the fact that they can be used to implement EM policies and eliminate or reduce Ers, they have helped increase awareness of the significance of Ers that each management system or tool addresses. However they do not bring about sufficient global solutions related to the three aspects to consider. Since Rist’s 1961 publication, a new management technique using DS has gradually emerged. Used mostly in scientific applications and management, the technique goes beyond a graphical representation to identify interactions, problems and provide solutions through visual databases.

### **History of mining dynamic systems and completed research**

According to J. R. Sturgul (2001), DS is one of the most widely used techniques in management science since its first use in the mining sector in 1961. It has consequently evolved and has been used in other areas and to solve different problems. Focusing on its use today in mining and OPMs, this work outlines the exponential increase in software used for digital simulations. Table 5.4 lists sixteen software applications, including the now archived Symbolic programming system language (SPS) (K. Rist, 1961) which was the first application used for digital simulation. Automod and GPSS/H are among the most widely used simulation applications, with Vensim gradually gaining in popularity in the mining industry since its introduction in 2013 (Li et al., 2013; J. Sturgul, 1997; Yuriy, 2005).

Tableau 5.4 Simulation software used in the mining industry from 1961 to 2005

Software	Years			
	1961	1961–1970	1970–2005	2005 and +
SPS	◆			
SNOBOL		◆		
GPSS		◆		
GASP		◆		
SIMSCRIPT		◆		
SIMULA		◆		
ARENA			◆	
SIMSCRIPT II (MODSIM)			◆	
SLAM			◆	
SIMPLE + Extend			◆	
PROMODEL			◆	
POSES ++			◆	
AUTOMODFLEXSIM			◆	
GPSS/H			◆	
MATLAB				◆
AUTOMOD				◆

Publications on DS and risk management approaches for the mining industry highlight several specific objectives and research areas. Most of them are focused on: (1) the control of geological uncertainties in the aim of maximizing mineral production or profits; (2) the interrelated multiple sequential mining operations; (3) production scheduling; and, (4) lowest possible cost of the ore exploitation. Such objectives have favored the operations in the following research areas: (1) production optimization (Dimitrakopoulos & Ramazan, 2008; Osanloo et al., 2008; Ramazan & Dimitrakopoulos, 2007); (2) optimization using dynamic geometric representations (Askari-Nasab et al., 2007; Duncan & Rahman, 2013; Huang & Espley, 2005; Xiao-ping et al., 2015); (3) decision-making and risk management aids (Araz, 2013; Huang & Espley, 2005; Li et al., 2013; Mirchi et al., 2012); and, (4) dynamic modelling integrating economic analyses (Ghoddusi, 2010; Montiel & Dimitrakopoulos,



2015; Turner, 1999). Allowing for the observation of their contributions in part and related to key applications such as: (1) modelling of operations; (2) decision-making and multi-criterion aids; (3) risk or problem solving and identification; (4) DS of mining processes; (5) dynamic modelling for the creation of mines or pits; (6) modelling for mining scheduling with geographical data; and (7) production with profitability optimization in Figure 5.4. Then, simulation based on stochastic calculations in combination with artificial intelligence seem to provide powerful tools but limited against the type of ore, the environment, the random field of production planning and dynamic processes in open pit mines.

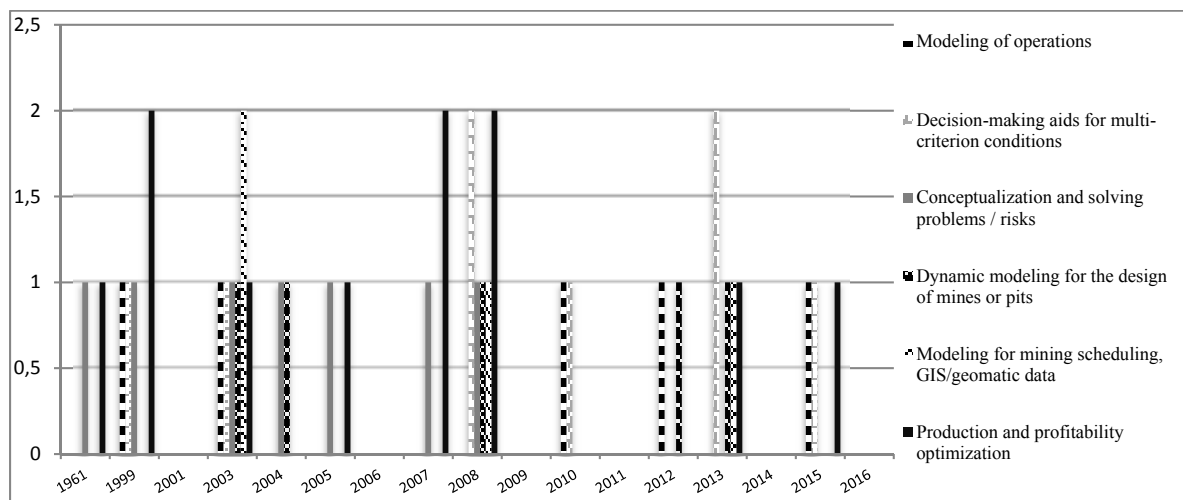


Figure 5.4 Research area history on dynamic simulation for the mining industry

As shown in Table 5.5 in the shaded gray column, no research has been done on the use of DS on these mining processes since 1961. However, these research results show opportunities for improvement of existing EM systems and tools if they are associated with DS systems.

Tableau 5.5 Summary of DS research areas covered in the literature

Data base	Peer-reviewed scientific papers	Areas studied						
		Modeling of operations	Decision-making aids for multi-criterion conditions	Conceptualization and solving problems / risks	DS of mining processes	Dynamic modelling for the design of mines or pits	Modeling for mining scheduling and GIS/geomatic data	Production and profitability optimization
Inspec & Compendex	Série de publication de «Australasian Institute of Mining and Metallurgy»							◇
	SGEM 2013 Conference Proceedings		◇	◇				
	Technical TMS Annual Meeting			◇		◇		
Scientific.net	Applied mechanical & materials	◇		◇		◇		
Springer	Mining technology (Institute of Materials, Minerals and Mining)		◇	◇		◇	◇	◇
	Proceedings of 4th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation		◇	◇				
Taylor & Francis	International Journal of Mining, Reclamation and Environment	◇	◇	◇		◇	◇	◇
	Journal of the Chinese Institute of Engineers							
	Journal of Systems Science and Systems Engineering		◇	◇				
	First International Symposium on Mine Simulation		◇				◇	
IEEE Xplore	Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)							
Hindawi	Discrete Dynamics in Nature and Society							

Tableau 5.5 (suite)

Data base	Peer-reviewed scientific papers	Areas studied						
		Modeling of operations	Decision-making aids for multi-criterion conditions	Conceptualization and solving problems / risks	DS of mining processes	Dynamic modelling for the design of mines or pits	Modeling for mining scheduling and GIS/geomatic data	Production and profitability optimization
Wiley & Son	Environmetrics	◇	◇					◇
	Scottish Journal of Political Economy			◇				
Google Scholar								

## 5.6 Discussion and future direction

With the objective of proposing an EM approach through digital technology, this article examines the results from partial practical implementations and literary reviews. Sections 5.6.1 and 5.6.2 pertaining to mining industry EIs describe the challenges the industry faces and the management systems and tools available for EM in the last decades. To further understand existing MEM challenges, this research has shown EFs linked to OPMs, and the resulting ERs from production processes. Consequently, ER management is of great importance during OPM operations. Works of Morteza et Mahdi (2014) on mine design considering sustainability aspects as well as research done by Pokhrel et Dubey (2013) or Prikryl et al. (1999) on ERs resulting from mining practices further demonstrate the urgency to reduce these risks during mining operations. Results here have shown that the five most frequently used EM systems and tools (from 1999 to 2014) help in the management and reduction of certain impacts affecting ecological and social structures. For example, an EIA lists all possible impacts according to operation type and specifics on surrounding environment while EMSs specify only certain risks identified during operations while considering EIA results as well. EA is a relevant system, but does not always reflect the level of activity at production sites. Yet from the perspective of reinforcing environmental protection practices and legislation, the mining industry has an obligation to promote continuous observation of environmental, social and economic components which must generate fewer and fewer risks over time. This analysis thus helps to better redefine their

respective purposes and applications. By observing on one hand such challenges with the technical aspects of production, this article helps in reinforcing not only the importance of EM systems and tools, but also the need to update such systems and tools for continuous improvement. On the other hand, the literature effectively shows the profound awareness on the problems. For example, they have a lack of linking to all technical aspects, which nevertheless unfailingly support operations of the mining industry. This raises a fundamental question about the effectiveness of these systems and tools and the consistency of their roles in environmental protection. In addition, the proliferation of tools, EM practices since 1992 and the volume of publications required has made their use difficult and cumbersome for managers which has encouraged actions such as the integration of management systems supported by several authors (Almeida, Domingues, & Sampaio, 2014; Zeng, Shi, & Lou, 2007). So, it is within this state of affairs of resolving certain critical issues on wastewater management, safety and production performance (financial analyses and production optimization), where impacts are significant (for sustainability) which prompted the mining industry to use other systems and tools. Among these tools is the progressive presence of DS following its proven effectiveness in solving several problems in many areas such as economics, health and safety. Results from the review of: DS history in the mining industry, evolution of simulation software and publications or scientific contributions as shown in Figure 5.4 and Table 5.5, were provided for the progressive use of this new tool. After compiling a list of sixteen software applications used since 1961, with fifteen still used today in the mining industry, it was evident that DS is gradually becoming the tool of choice for mining engineers. This interest is characterized by organizational profitability needs or requirements of managers or investors. About 40% of the covered publications center on: (1) financial profitability through meeting of performance targets or optimization techniques and (2) decision-making aids (multi-criterion) required by managers due to the multidisciplinary nature of the mining sector. However, there are still some simulation software applications such as Vensim by C. H. Yu et al. (2003), which remain unknown within the mining industry. A dominant amount of information concerning DS within the mining industry for multiple areas is found within the literature. Aiding in research for a variety of publications on decision-making, modelling of operations, mine pit design and risk resolution rarely

linked with the environment and mining industry planning. Moreover content on DS used in general operations of OPMs was not found, however works of Bouloiz et al. (2013) provide an overview of DS for an organization and its related environment. The benefits are numerous, including: (1) monitoring of all system components, (2) aid in decision-making, (3) detailed analysis of influencing factors (IFs) as well as interactions and implementation of best practices. Important elements known to be also unavoidable key factors aspects for EMs systems. Such a management system includes the planning of activities according to established environmental policies and implementation while regularly monitoring the effectiveness and results of actions. Following that train of thought, DS can serve as a basic platform beneficial to a mining company's EM system needing further development. This approach is supported by a publication from C. H. Yu et al. (2003) who used the Vensim simulation software to develop a dynamic model on the sustainable use of land resources. Upon completion of their work, in addition to having identified the potential interactions in the system, determined the variables or indicators for aids in decision-making, the simulation helped in identifying the relevant components for the sustainable management of land resources. It adds up to the possibility of being able to use DS as a complementary system to existing EM systems and tools. DS, unlike other existing systems and tools, is more comprehensive because it not only considers the issues, but also all connected and interacting elements and thus serves as a multidisciplinary toolbox also used for multi-division collaborations. This system also allows for real-time risk management through its interfaces and consequently in a reduction of reports to write.

Following related analyses and the results of C. H. Yu et al. (2003), a single-sequence representation of an OPM extraction process was completed through Vensim in a loop diagram to confirm theory. The diagram showed that the extraction process has negative impacts on the environment but is nonetheless conditioned by an extraction rate regulating the production of minerals. Thus, the elements of a system may be further broken down in order to reveal IFs, interactions between elements, illustrated processes, and to perform detailed analyses.

## 5.7 Conclusion

With the objective of proposing an EM approach through digital technology, this article examines the results from partial practical implementations and literary reviews. Sections 5.6.1 and 5.6.2 pertaining to mining industry EIs describe the challenges the industry faces and the management systems and tools available for EM in the last decades. To further understand existing MEM challenges, this research has shown EFs linked to OPMs, and the resulting ERs from production processes. Consequently, ER management is of great importance during OPM operations. Works of Morteza et Mahdi (2014) on mine design considering sustainability aspects as well as research done by Pokhrel et Dubey (2013) or Prikryl et al. (1999) on ERs resulting from mining practices further demonstrate the urgency to reduce these risks during mining operations. Results here have shown that the five most frequently used EM systems and tools (from 1999 to 2014) help in the management and reduction of certain impacts affecting ecological and social structures. For example, an EIA lists all possible impacts according to operation type and specifics on surrounding environment while EMSs specify only certain risks identified during operations while considering EIA results as well. EA is a relevant system, but does not always reflect the level of activity at production sites. Yet from the perspective of reinforcing environmental protection practices and legislation, the mining industry has an obligation to promote continuous observation of environmental, social and economic components which must generate fewer and fewer risks over time. This analysis thus helps to better redefine their respective purposes and applications. By observing on one hand such challenges with the technical aspects of production, this article helps in reinforcing not only the importance of EM systems and tools, but also the need to update such systems and tools for continuous improvement. On the other hand, the literature effectively shows the profound awareness on the problems. For example, they have a lack of linking to all technical aspects, which nevertheless unflinchingly support operations of the mining industry. This raises a fundamental question about the effectiveness of these systems and tools and the consistency of their roles in environmental protection. In addition, the proliferation of tools, EM practices since 1992 and the volume of publications required has made their use difficult and cumbersome for

managers which has encouraged actions such as the integration of management systems supported by several authors (Almeida et al., 2014; Zeng et al., 2007). So, it is within this state of affairs of resolving certain critical issues on wastewater management, safety and production performance (financial analyses and production optimization), where impacts are significant (for sustainability) which prompted the mining industry to use other systems and tools. Among these tools is the progressive presence of DS following its proven effectiveness in solving several problems in many areas such as economics, health and safety. Results from the review of: DS history in the mining industry, evolution of simulation software and publications or scientific contributions as shown in Figure 13 and Table 5.5, were provided for the progressive use of this new tool. After compiling a list of sixteen software applications used since 1961, with fifteen still used today in the mining industry, it was evident that DS is gradually becoming the tool of choice for mining engineers. This interest is characterized by organizational profitability needs or requirements of managers or investors. About 40% of the covered publications center on: (1) financial profitability through meeting of performance targets or optimization techniques and (2) decision-making aids (multi-criterion) required by managers due to the multidisciplinary nature of the mining sector. However, there are still some simulation software applications such as Vensim by C. H. Yu et al. (2003), which remain unknown within the mining industry. A dominant amount of information concerning DS within the mining industry for multiple areas is found within the literature. Aiding in research for a variety of publications on decision-making, modelling of operations, mine pit design and risk resolution rarely linked with the environment and mining industry planning. Moreover content on DS used in general operations of OPMs was not found, however works of Bouloiz et al. (2013) provide an overview of DS for an organization and its related environment. The benefits are numerous, including: (1) monitoring of all system components, (2) aid in decision-making, (3) detailed analysis of influencing factors (IFs) as well as interactions and implementation of best practices. Important elements known to be also unavoidable key factors aspects for EMs systems. Such a management system includes the planning of activities according to established environmental policies and implementation while regularly monitoring the effectiveness and results of actions. Following that train of thought, DS can serve as a basic platform beneficial

to a mining company's EM system needing further development. This approach is supported by a publication from C. H. Yu et al. (2003) who used the Vensim simulation software to develop a dynamic model on the sustainable use of land resources. Upon completion of their work, in addition to having identified the potential interactions in the system, determined the variables or indicators for aids in decision-making, the simulation helped in identifying the relevant components for the sustainable management of land resources. It adds up to the possibility of being able to use DS as a complementary system to existing EM systems and tools. DS, unlike other existing systems and tools, is more comprehensive because it not only considers the issues, but also all connected and interacting elements and thus serves as a multidisciplinary toolbox also used for multi-division collaborations. This system also allows for real-time risk management through its interfaces and consequently in a reduction of reports to write.

Following related analyses and the results of C. H. Yu et al. (2003), a single-sequence representation of an OPM extraction process was completed through Vensim in a loop diagram to confirm theory. The diagram showed that the extraction process has negative impacts on the environment but is nonetheless conditioned by an extraction rate regulating the production of minerals. Thus, the elements of a system may be further broken down in order to reveal IFs, interactions between elements, illustrated processes, and to perform detailed analyses.

### **Disclosure statement**

The authors reported no potential conflict of interest.



## CHAPITRE 6

### **Article 3 : ENVIRONMENTAL RISKS IN OPEN PIT MINES: REPRESENTATION OF A TEMPORAL EVOLUTION RELATED TO WATER FACTOR**

S. B. Mondoukpè Lagnika <sup>a</sup>, Robert Hausler <sup>b</sup>

<sup>a</sup>, <sup>b</sup>, Station expérimentale des procédés pilotes en environnement (STEPPE); Department of construction engineering; École de technologie supérieure, Canada

Article soumis et accepté dans «Environmental Management and Sustainable Development [EMSD]», de Macrothink Institute, Vol. 7, No. 4, November 2018 (*in Press*)

#### **Résumé**

Les ressources naturelles sont une source d'instabilité écologique. Elles font l'objet de nombreuses recherches ce qui a conduit au renforcement des mesures. Cependant, l'exposition aux dangers (pollution eau-air-sol, rayonnement, dégradation, etc.) due aux industries comme l'exploitation minière continue. Cet article vise à montrer les relations dynamiques entre la production et le temps dans le cadre d'une synergie de l'ensemble du système d'extraction au fil du temps. Étant donné la sensibilité des problèmes connus au cœur des opérations minières, l'eau est donc le seul facteur environnemental considéré pour alléger la méthodologie de recherche. Ainsi, après l'hypothèse, un graphique temporel avec le temps et le niveau de production minière comme variables explicatives et dépendantes, est développé. Ensuite, une attention particulière est accordée à la validation des hypothèses utilisée pour révéler le résultat conjoint de ces deux variables. Ceci est réalisé par une revue de littérature sur les outils de gestion des risques environnementaux existants, sur les mines à ciel ouvert par l'analyse de régression linéaire simple. Le résultat de Student T-test apparié aidera plutard à clarifier le potentiel de cette approche statistique.

**Mots-clés:** Environnement, Mines, Risques, Temporel, Dynamique, Système, Temps

**Abstract**

Natural resources are sources of much ecological instability. They are subjects of many types of research and led to the strengthening of measures. However, the exposure to hazards (water-air-soil pollution, radiation, degradation, etc.) due to such industries as mining continuous. This paper intends to show the dynamic relationships between production and time as part of the synergy of the whole extraction system over time. Given to sensitives issues known in the heart of mining operations, water is, therefore, the only environmental factor considered to lighten the research methodology. So, after the hypothesis, a temporal graphic with time and mining production level as explanatory and dependent variables is developed. Then, attention is given to the hypothesis validation used to highlight the joint result of the two variables. This is done by a literature review on environmental management risks tools existing, in-depth on the open pit mines with the simple linear regression analysis. The paired T-test Student result will help to clarify the potential of this statistical approach.

**Keywords:** Environment, Mines, Risks, Temporal, Dynamic, System, Over time

**6.1 Introduction and Scope of Study**

The increase of industrial activity in recent decades has revolutionized many lifestyles since the industrial revolution. The various ores processing levels into products of public or individual utility are known to be a source of a whole range of risks most of whom start at every step of ore extraction from its natural environment (Křibeka et al., 2014; Peck & Sinding, 2003; Singh et al., 2011). Accordingly, several environmental factors (EFs) are affected despite the diversity of environmental management tools available. But, among these EFs, water, although tied up to basic needs of all life on earth, is also intrinsically linked to mining operations and essential to industrial activities. Indeed, in mining, there were millions of cubic meters are used, and millions of cubic meters of waste water are produced (Statcan, 2012). This because of, its use in the extraction process (drilling), production (crushing) and, in processing of minerals (enrichment). These lead to an ecological instability highlighted since the Rio conference (1992) and subject to in-depth

discussions of many authors like Kalabin (2012), Pokhrel et Dubey (2013) but, also lead to dynamic impacts.

Any system evolves. It is so for the ecosystem components as well as for phenomena such as risks, and especially here by those related to the environment. In open pit (OP) mines case, risks evolve and have different consequences on the living environment. Many studies expose the mining ecological challenges despite the solutions developed (Lintukangasa et al., 2012; Singh et al., 2011). Do they depend on the degree of influence on EF? Time? Or the production speed? Based on the integrated environmental management system, production levels and the technical HAZID environmental risk identification from construction to a cessation of mining activities, a graphical mapping has been achieved to observe a non-linearity of risks evolution over time. Indeed, by focusing on phases over time and production as explanatory and dependent variables, this latter does not have a symmetric role contrary to the correlation that one thinks to observe. This article shows a point cloud that can then be compared to ordinary least squares regression used to determine the extent to which a variable explanatory-dependent relationship affects the result (joint  $X_i, Y_i$ ) which are related risks. Name of the linear regression technique in statistics, ordinary least squares allows by a linear relationship (in matrix form  $Y = \beta_0 + X\beta + \varepsilon$ ) to adjust the cloud of points in a straight line called regression. Finally, the link between time and production as well as the sensitivity of the EFs was predicted by considering the paired T-test Student with simple linear regression (SLR) analysis.

## **6.2 Research Methodology**

### ***Research hypothesis***

Despite the fact of growing risks in the academic research world, risk knowledge in the industry environment, it is even more complex in mining because of much specificity. The existing tools for risk analysis are not directly applicable and so is it in mining. It's already known that risk is the product of exposure multiplied by consequences but, by intending a temporal representation of the risks, it is assumed here that the environmental risks are

associated with mining production and time (per phase). The risk, therefore, depends on time (per phase), and this one varies linearly with the production.

### ***Materials and Methods***

By limiting the scope, this research aims to show: the real evidence of the intrinsic link between production, time (per phase), the risks involved and the opportunity to represent an approximate evolution of environmental hazards over time. To lighten the research methodology, water is the only EF considered and it is considered that the OPs operate similarly. The type of mine, the kind of material and the number of employees are not taken into the temporal risk assessment. This is done by a literature review about the environmental management risks tools existing, in-depth on the OPs and probability theories with SLR. Full results of this approach are summarized in section 4.

### ***Risks and Calculation methods***

The risk notion defined by the probability of occurrence of a dangerous or unsafe condition amplified by the severity of the consequences of it, an overview of the proposed calculations of risk in the literature allowed keeping two (2) main known trends.

From Biron, Ivers, Brun, et Cooper (2006):

$$\begin{aligned} \text{Risk(R)} &= \text{Probability of risk occurrence} && (6.1) \\ &= E(\text{exposure}) \times K(\text{coping}) \times C(\text{consequences}) \end{aligned}$$

From Clarke et Cooper (2000):

$$\text{Risk (R)} = \text{Probability of risk occurrence} = E(\text{exposure}) \times C(\text{consequences}) \quad (6.2)$$

After analysis of risk score Bowles (2003) with Braband et Griebel (2004) believe that a simple multiplication is not appropriate. Then they proposed a logarithmic transformation with parameters having a scale from 1 to 10 to correct these lacunae as mentioned earlier:

$$R = \log_b(IH) + \log_b(POA) + \log_b(HD) + \log_b(RS) \quad (6.3)$$

Where: IH is impact of hazard; POA is probability of occurrence of an accident; RS is the research specificities defined by the authors; HD (detectability of hazard) is defined by its reliability, availability, and selectivity. But the result is still monotone and also has a form even simpler than the product which could make hard to perform a detailed risk analysis when there is an interaction/combination of hazards. Therefore, the equation (1) is the one taken into account in this study. However, the consequences (C) or coping (K) levels values, belonging to a framework of OPs, for this research will be fixed at 1 for each risk. Then, the equation becomes:

$$R = E \text{ (exposure)} = \text{Probability of risk occurrence (O)} \quad (6.4)$$

According to Grosso, Ouedraogo, et Meyer (2012) the probability of risk occurrence could be  $O = e + 2 \text{ are} + L$  (with: e – exposure frequency, po – probability, L – possibility to avoid or limit the damage) because of other authors like Bowles (2003) who found out that the general Eq. (1) leads to duplication of some risks based on changes in factors affected. Indeed, the risk scale is vast because of hypersensitivity to the slightest change in the affected elements, which result in impacts of various natures even if it's small changes. Then, the risk computation method finally retained is the probability of risk occurrence (O) knowing the supply chain in time (T):

$$\begin{aligned} R &= \text{Probability of risk occurrence (O)} \\ &= P(O|T) = P(O \cap T) / P(O) \end{aligned} \quad (6.5)$$

Before using these mathematical models, inventory of environmental risks related to the water that will be studied here must be done.

### ***Environmental risks associated with water in an OP mine***

Based on the integrated environmental assessment system, the methodology in this second part refers to the environmental risk assessment, which is to identify and prioritize risks despite the uncertainty of their occurrence. At this stage, the first step is to identify the environmental risks related to water in an industrial OP mine cause there are many differences with artisanal OP mine. This consists of determining which hazards affect the environment factors including humans by using a known technique. There is many risk identification variable, but the hazard identification (HAZID) method is selected here due to the coexistence of operations humans and the EFs. Indeed, as told Nakayama, Sakamoto, Kasai, Shibutani, et Miyake (2016) even there are some qualitative and quantitative methods like: the risk and operability study method (HAZOP), the failure mode and effect analysis method (FMEA), the fault tree analysis method (FTA) and so on. But HAZID combined both methods that lead to better risk management processes.

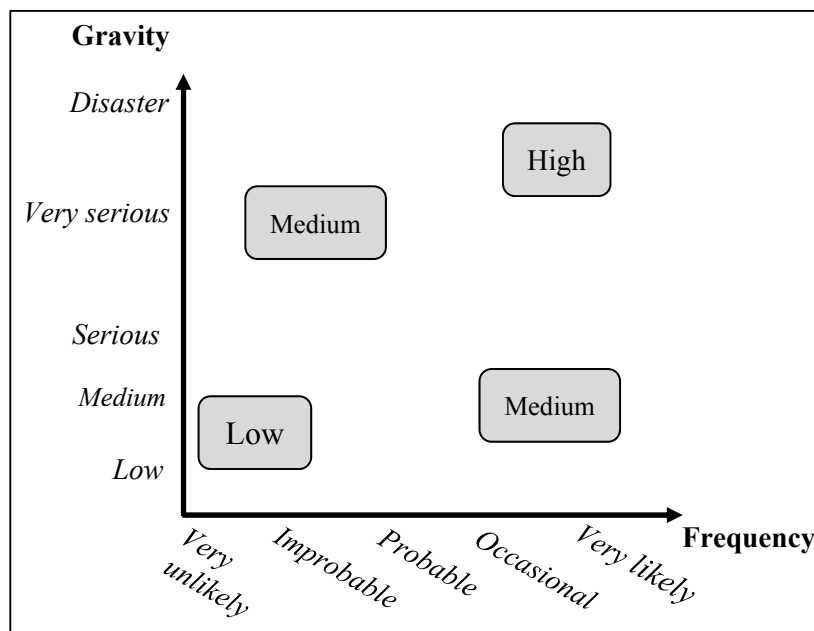


Figure 6.1 Risk assessment by prioritization

This technique allows obtaining a cloud of risk points with low, medium or high-risk priority like in Figure 6.1 above. But before, it's important to explain the way the graph of the evolution of risks based on production and mining phases in time has been built.

The X-axis is scaled over an average fictitious value of 25 years since the construction of the mine to the cessation of extractives activities. This axis is divided into three main periods:  $t_1$  = construction with installations (0 to 5),  $t_2$  = operation (5 to 19) and  $t_3$  = cessation (19 to 25). The ordinate axis (Y-axis) on the other hand indicates the percentage of production up to 100%. Then through the probability of occurrence risk equation for each period equivalent to the production level, a point is marked. Here is an example: the noise risk is permanently observed throughout all phases of any mine life cycle. But it is known that noise becomes awkward at the beginning of mine construction activities at 0.75 years so in less than a year of activities which corresponds to a low production certainly, around 12%, but not negligible. So each data point along the graph is the result of interactions between the elements of time and the approximate level of production corresponding. This is how the cloud points corresponding to the risks have been represented. Obtaining this point cloud allows drawing a line going from an average closer to all points. This line is called a straight line of regression that will be used to validate the research hypothesis.

### ***Research hypothesis testing and simple regression analysis***

This is done by estimating the linear regression parameters with T-test of student with a statistical tool. There are many statistical tools such as Microsoft Excel, Statistical Package for the Social Sciences (SPSS), Statistical tools for high-throughput data analysis (STHDA), and so on, but STHDA is which served in this study.

The regression is used in the prediction of quantitative variables, in knowledge of conditional average or another variant of this kind and for the analysis of relationships between variables. It also allows describing the endogenous variables associated with exogenous variables. So here, by validating the assumption that a function connects an explained variable with an explanatory variable, the SLR model also helps to demonstrate the uncertainty of the system due to risks. Here is the Eq. (6.6) in factorial form:

$$y = \beta_0 + x\beta + \varepsilon \quad (6.6)$$

Where  $\mathcal{Y}$  is random explained or dependent variable;  $\mathcal{X}$  is independent or explanatory variable;  $\beta_0$  is Y-intercept;  $\beta$  is the slope;  $\mathcal{E}$  is a random error term, unobserved, independent and identically distributed (C. Yu & Yao, 2016).

Then, for each individual statistic under the Gaussian assumption, the equation system model is:

$$\mathcal{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \mathcal{E}_i \quad (6.7)$$

Where  $\beta_0 \dots \beta_n$  are unknown and are assumed to be constants;  $\mathcal{E}_i$  is a zero-expectation (Yerel & Ersen, 2013). But since there are only one dependent variable and one explanatory variable in this study's context, there will be no extension to the multiple linear regression and the final equation is:

$$\mathcal{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 \mathcal{X}_i \quad (6.8)$$

Where  $\beta_0 \dots \beta_n$  are assumed to be constants;  $\mathcal{Y}$  the dependent variable;  $\mathcal{X}$  the independent or explanatory variable. Finally, when the regression line equation is determined, the T-test Student approach also known as Student's paired test, in this case, is used to validate the research hypothesis by comparing the variable groups. Indeed, it is a paired T-test because both groups are from the same OP mine.

### ***T-test Student principle***

This test is any statistical hypothesis test that enables to accept or reject the formulated hypothesis. The general hypothesis is: «the risk depends on time (per phase), and this one varies linearly with the production», but it is necessary to formulate the statistical hypothesis:  $H_0$ ,  $H_1$ . The null hypothesis ( $H_0$ ) means that there is no significant distinction between the averages of two variables groups as follows:  $\beta_0 = \beta_1$ . Contrary to the null hypothesis, the alternative hypothesis ( $H_1$ ) corresponding to the general assumption states that there is a significant difference between the averages of the two groups, so  $\beta_0 \neq \beta_1$ . It is the existence



of this difference (by rejecting the null hypothesis) that allows inferring the existence of a link between  $\beta_0$  and  $\beta_1$ .

As a reminder, let recall that in human sciences, the significance level is 0.05 corresponding to the risk  $\alpha = 5\%$  for one degree of freedom (d.f. =  $n - 1$ ). Also, it is important to note that the hypothesis here is bilateral due to  $H_0 (\beta_0 = \beta_1)$  and  $H_1 (\beta_0 \neq \beta_1)$ . If the T-value is calculated, the probability value (p-value: the observed level of importance for this test) could be compute also and it's compared to the significance level. Usually, T-value is manually given by the mathematical formulation below.

$$T = m/s / \sqrt{n} \quad (6.9)$$

Where  $m$  is the mean of the difference between the two measures for each observation pair;  $s$  is the standard deviation of the difference between the two measures for each observation pair; and,  $n$  is the size of the series of observation pairs.

But, being supported by other programs, the calculation has been made directly with STHDA. So, if  $p\text{-value} > 0.05$ , the null hypothesis must be accepted that there is no significant difference between  $\beta_0$  and  $\beta_1$ . But, if the  $p\text{-value}$  is  $< 0.05$ : the null hypothesis will be dismissed and then, obviously there will be an important link between  $\beta_0$  and  $\beta_1$ .

### **6.3 Results**

#### ***Ecosystem components dependent on water***

The consumption of water in the mines is considerable. For example, from 2011 with 8.9 millions  $m^3$ , Agnico-Eagle Mines Limited™ has decreased the volume of discharged effluent in 2012 to 7.2 millions  $m^3$  (Grondin, 2012). This is still a significant amount for a company among so many others. Described as a unique solvent by Falkenmark (2001) is the water carrier to the time of solutes, sediment and other materials through various spectra of the environment. For this reason, although it is an EF, it is directly and indirectly linked to different elements of the ecosystem to which it belongs.

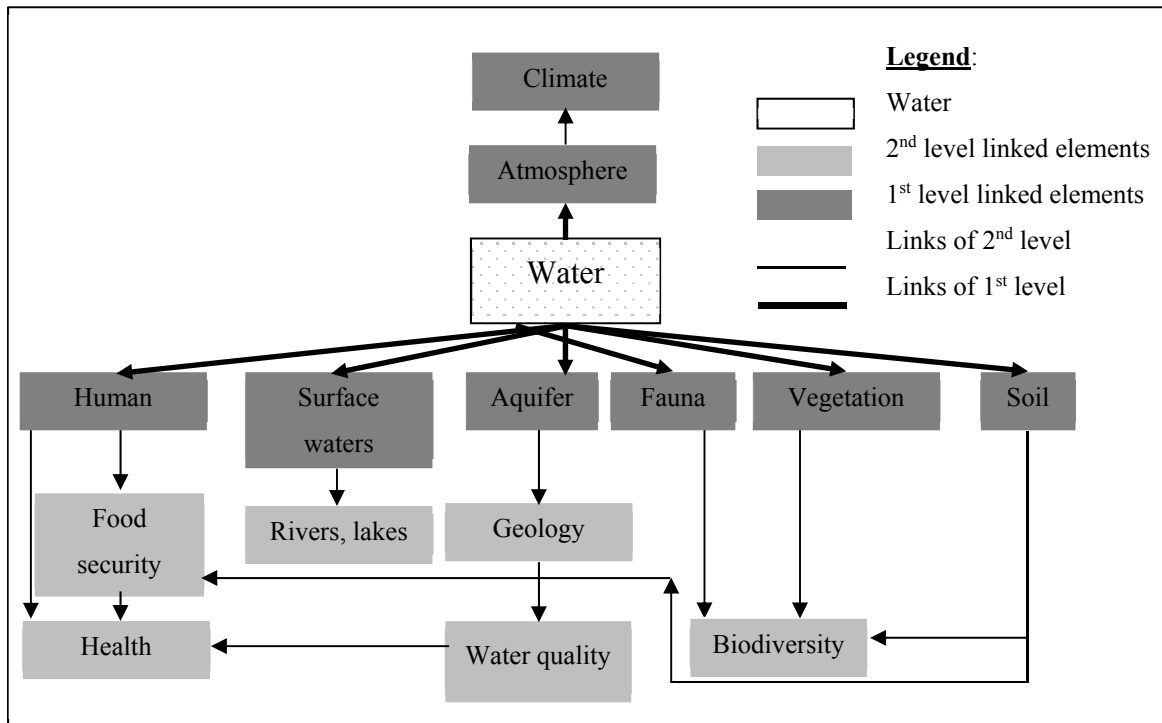


Figure 6.2 Conceptual representation of elements of ecosystem's factors depending on water

Thus, once contaminated or destabilized, it becomes a vector, a factor or a source of risk that affects all the elements to which it is itself linked to an industrial activity such as mining. In Figure 6.2 below these elements are illustrated. Moreover in mining, contaminants, and composition of ore or waste rock can change, by reactions when exposed to light and air, water characteristics with the risk of rendering it unusable.

For example, the enrichment process that aims to achieve a high concentration of these metals regarding production is a significant source of chemical use and contaminated water emissions (Mballo, 2012). Here is why Soni et Wolkersdorfer (2016) emphasized the need to know the aspects of water management around the mines. And these thoughts induced the illustration in Figure 6.3 below about areas use of water in the production process in OP mine.

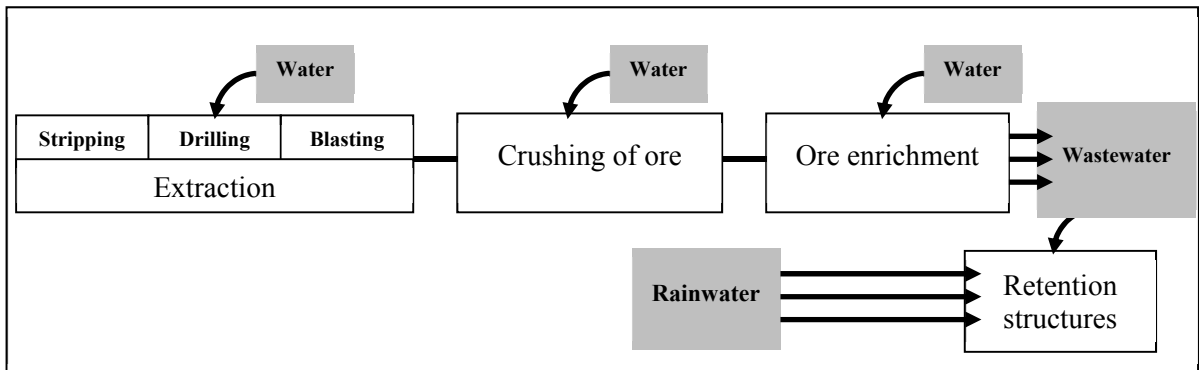


Figure 6.3 Areas use of water in the OP mining process

*Risks identification related to water*

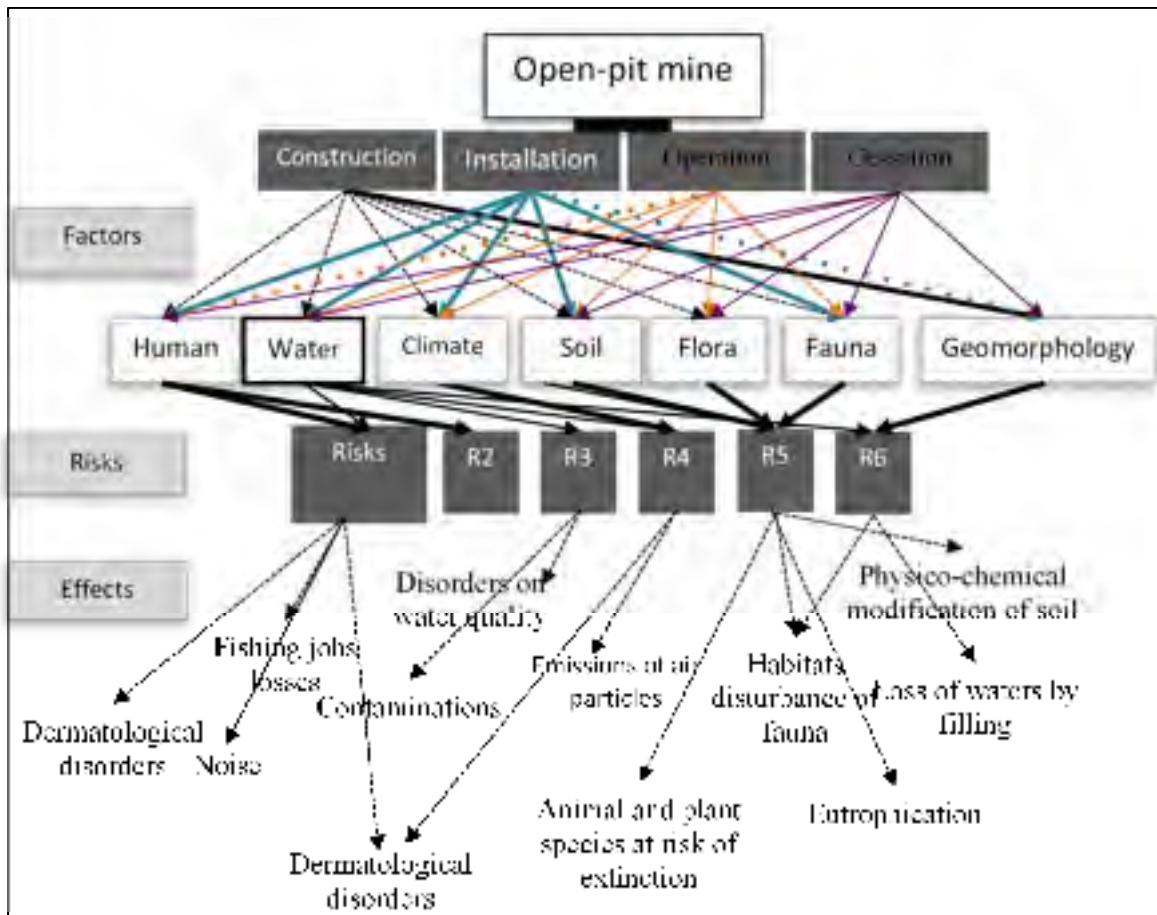


Figure 6.4 Identification and risk characterization related to water through HAZID method

Based on the fundamental principle of the systems, the next step before the mapping of risks linked to water is to identify at best through appropriate hazards identification techniques, the risks incurred from use of water in mining operations. The identification here by HAZID in Figure 6.4 was made according to each phase of time and EF afterwards.

***Qualitative and Quantitative Data from Matrix of Symbol Values or Numerical Matrix***

Identifying these risks demonstrates the synergy in which they operate. Authors like Teparut et Sthiannopkao (2011) and George et al. (2010) have documented the impacts on physicochemical characteristics of water and other EF related to water. While many efforts are combined today by mining to fit better with the principles of sustainable development, the environmental consequences of mining on water remain numerous and affect many aspects of our ecosystem, including humans. Apparently, the water-related environmental risks seem to be a major concern which needs solutions. However, the temporal effect has been added to the probability of occurrence (O) in Eq. (6.5) to identify each risk in the graphic. But it is worth remembering that all identifiable risks are not present in this study.

***The risks temporal mapping***

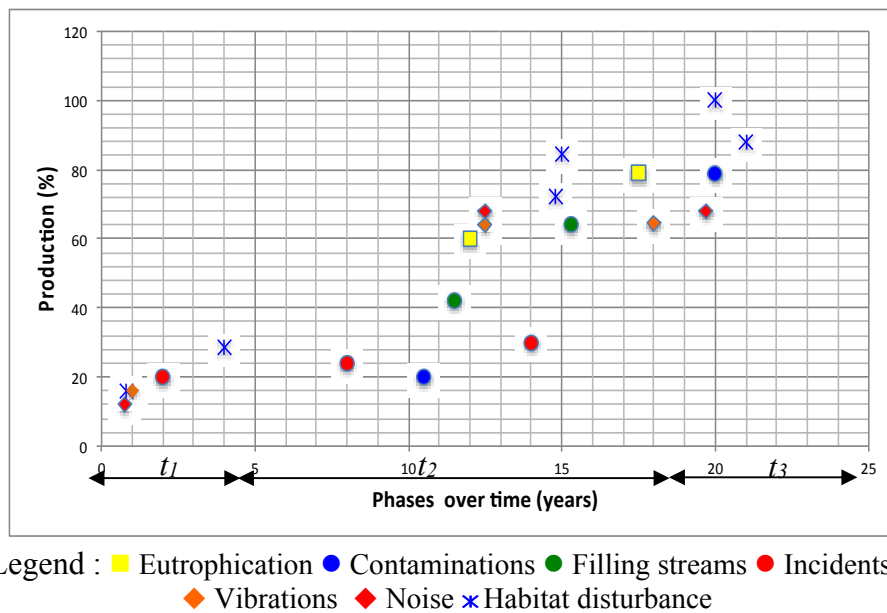


Figure 6.5 Graphical clouds of few environmental risks related to the water factor

***The linear regression line and validation of the assumption***

The regression line obtained in Figure 6.6 by knowledge of the researcher, the literature review and the Bayesian theory, the validation of the research hypothesis, has to be achieved first before completing the validation.

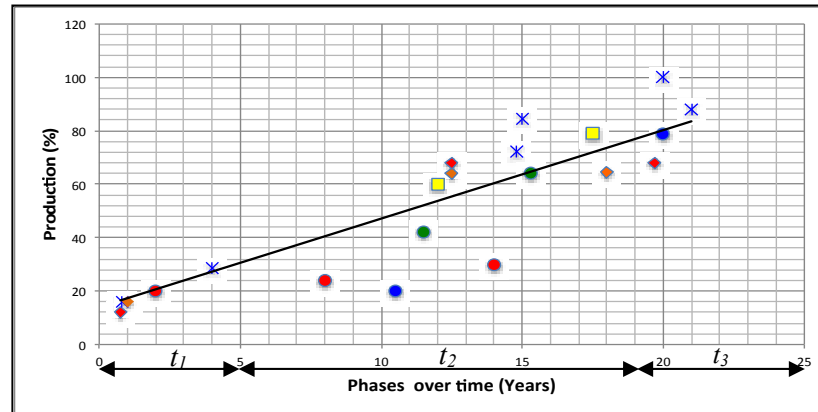


Figure 6.6 Evolution of the linear regression line over time

In this study, there are 21 observations pairs shown in Table 6.1 with the respective variables.

Tableau 6.1 Observations pairs with the corresponding variables

Observations pairs	Risk type	$x$	$y$
1	Noise	0,75	12
2	Habitats disturbance	0,8	16
3	Vibrations	1	16
4	Incidents	2	20
5	Habitats disturbance	4	28,5
6	Incidents	8	24
7	Contaminations	10,5	20
8	Filling stream	11,5	42,3
9	Eutrophication	12	60
10	Vibrations	12,5	64
11	Noise	12,5	68
12	Incidents	14	30
13	Perturbation des habitats	14,8	72

Tableau 6.1 (suite)

Observations pairs	Risk type	$x$	$y$
14	Habitats disturbance	15	84,5
15	Filling stream	15,3	64
16	Eutrophication	17,5	79
17	Vibrations	18	64,4
18	Noise	19,7	68
19	Contaminations	20	79
20	Habitats disturbance	20	100
21	Other disturbances	21	88

However, given the importance of validating the assumption and clouds of risk points (involved about water factor), statistical methods to analyse and explore the relationships between one or several variables have been scanned. Among them, as it said in section 3, the T-test of student appears to be the most appropriate. Here is the result in Table 6.2.

Tableau 6.2 Paired T-test results with the corresponding variables

T	<i>d.f.</i>	<i>P-value</i>	Confidence interval (95 %)
- 8.328	20	6.231 e <sup>-08</sup>	[-50.546, -30.2969]

Groupe	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>
$x_{i1}$	21	11.9452	6.7905
$x_{i2}$	21	52.3667	28.0031

In the result above: T = -8.328 is the Student statistic; d.f. = 20; Probability value (p-value) is the degree of significance test =  $6.231 \times 10^{-08}$ ). Finally, the confidence interval of the difference of means to 95% is = [-50.546, -30.2969].

$$p - \text{value} = 6.231 \times 10^{-08} = 0,0000000623 < 0,05$$

As  $p - \text{value} < 0,05$ ,  $H_0$  is rejected

The p-value of this paired test is  $6.231 \times 10^{-08}$ , which is much lower than 0.05. Then it can be therefore stated that the environmental risks depend on time, and they vary linearly with the mining production with a  $p - \text{value} = 6.231 \times 10^{-08}$ .

#### 6.4 Discussion

The research purpose was to confirm if environmental risks depend on time and vary linearly with the production. Of course, the use of a particular technique depends on the aims of the analyses, so simple regression analysis has been chosen. The prediction of value by using the linear regression analysis is an important aspect used in mining issues by some authors like Yerel et Ersen (2013) but not associated with environmental management. Here particularly, it's applied to determine the real relationship between dependent variable production (%) and independent variable phases over time (year). Despite their differences, a harmony can exist and it has been found in statistics with the simple regression analysis. SLR modelling in the presence of the straight line of regression in Figure 6.6, which has been dealt to validate the hypothesis and address, the relevant issues about the influence of production and time on hazardous situations for environment and humans. The regression line is plotted to point out the links between production (%) and phases over time (year). Then, the statistical significance and validity of the research hypothesis have been checked by using the paired T-test student previously described.

The p-value of the model is  $6.231 \times 10^{-08}$ , which is equivalent to  $p\text{-value} < 0.05$ . Since it is concluded that there is a statistically significant relation between production (%) and phases over time (year) at the 95% confidence interval. Thus, by rejecting the null hypothesis ( $H_0$ ),  $\beta_0 \neq \beta_1$  and, the model is statistically valid.

The involvement of water as a fundamental element of mining operations (Fig. 6.3) and intrinsically linked to the other EF (Fig. 6.2) shows his aptitude to act as a diffuse source of various risks in case there is contamination (Fig. 6.4). Indeed, by ecohydrological

interactions, the contaminants affect the chemistry, biology, environment, productivity, water quality and viability also. A dynamic interaction, demonstrating the plurality of negative impacts arising from the imbalance of an ecosystem factor which covers, in turn, more than one factor. And this, despite the scientific efforts made to fit better with sustainable development principles. Several types of research studies including those by Jordan et al. (2004) and Falkenmark (2011) jointly with other academic studies have stated irregularities in certain aspects of water-related policies. But, the study outlines why it is worth remembering that knowing in depth all the risks associated with water in mining should be the starting point in environmental hazards management. Obviously, all these phenomena also demonstrate the synergy in which mining operations are performed, how to appear and evolve the risks in each step.

To understand it in more details, the temporal mapping designed in section 6.3 (Fig. 6.6) indeed shows the occurrence of risks, their apparition order, but, above all a proliferation and persistence of some risks in time. This explains why by taking into account effect, probability and consequence of each risk actually considered in risk formula – Eq. (6.5): 1) the extent of some risks is amplified over time; 2) there are also certain risks which recur, and; 3) some risks frequently involved. Furthermore, it is obvious to see that the probability of occurrence value of each risk can only be approximative because of the sensitivity of the sources of risk and ecosystem diversity. So, the result just illustrates the cumulative effects all along the life of an OP mine with the repetition of some operations and amplification of impacts such as various disturbances, noise, and vibrations until production ceases. This plurality of environmental risks, thus recognized, the susceptibility of Efs, the diversity of deposits of minerals and mining operations associated with, can testify the difficulties to effectively solve environmental problems with current tools. But, through the use of this dynamic approach in future work with some tools that meet the basic principles of dynamic systems, it is possible to contribute to intensive changes in the environmental risk management system in OP mines, underground also and other similar industries such as manufacturing.



## **6.5 Conclusion**

Due to the identification of points of water entry into OP mine, the mapping of environmental risks related has fostered the exhibition of partial ecohydrological interactions in mining. The analysis allows deducting some dynamic parameters, which are 75% sources of risk on the site and around them. We have: 1) extraction procedures, which may vary from OP or minerals to another; 2) enrichment processes, and; 3) the type of wastewater retention structures. Mining is one of the most influential sectors in the world economy. The results here are rather optimistic and show that the model defined could help early to integrate quantitatively at the planning, impacts of the operations. According to this research the temporal representation of the related risks to water in OP mines highlights a dynamic analysis with a nonlinear combination of severity, probability as an environmental hazards dashboard. For this reason, the environmental risks management tools for mining may improve worldwide if we include the linear regression analysis. Since environment is a global state of ecosystems, this approach must be extended to all Efs in future research but, by taking in account the polynomial function of risks arising from the interactions, multiple linear regression analysis can be more useful. Furthermore, this work is helpful for dynamic systems and other perspectives like the development of better environmental risks management tools in mining.

## **Acknowledgment**

The authors kindly thank the representatives of the School of High Studies in Public Health (École des Hautes Études en Santé Publique, EHESP) in France and the University of Sherbrooke in Canada for the possibility given to set out a partial communication of this work at the 84e ACFAS. They also recognize the constructive involvement of their supervisors. They also recognize the constructive involvement of their supervisors and Ms. Osseni Achabi Chakirath.

**Copyright Disclaimer**

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

## CHAPITRE 7

### DISCUSSION GÉNÉRALE

#### 7.1 Enjeux environnementaux en lien avec le facteur hydrique

Les risques environnementaux recensés dans la littérature et reliés à l'exploitation des mines à ciel ouvert (MCO) sont nombreux et vont au-delà des facteurs hydriques. Agbo et Honkpehedji (2009) citent la perte de fertilité des sols tandis que M. S. Lagnika (2004) renchérit avec : les pollutions de l'air, les nuisances sonores, les vibrations, les rejets d'eaux usées, la déstabilisation des nappes souterraines, de la faune, de la géomorphologie, de la pédologie et de la flore. Toutefois, Křibeka et al. (2014), ont rajouté la contamination par les poussières (solubles et insolubles) des sols, des végétations et l'acidification des eaux. Également, l'usage d'équipements à la fine pointe de la technologie et de la biotechnologie est responsable de d'autres risques et émergents (Bonzongo et al., 2002; Csavina et al., 2011; Donkor et al., 2005; Müezzinoğlu, 2003; Paruchuri et al., 2010). En effet, la nature du minerai, les conditions de formations géologiques ajoutées aux diverses opérations (sondage, d'écaillage, d'arrosage, de forage et des tirs à l'explosif) et d'enrichissement des minerais (au mercure, à la cyanuration, etc.) sont diverses sources de risques émergents documentées (MAC, 2010; NMA, 2010). Les rencontres internationales à Rio (1992), Copenhague (2009) puis à la COP21 (2015), etc. confirment l'accroissement des intérêts environnementaux des parties prenantes. Progressivement ainsi et grâce à l'éveil de la conscience sociale aux enjeux environnementaux, est dénoncée cette pluralité de déséquilibres dus aux activités minières. Quelques mesures d'atténuation ont été développées, mais il subsiste encore des défis environnementaux (Armstrong & Menon, 2000; Kalabin, 2012; Lyman & Feiveson, 1998; Pokhrel & Dubey, 2013).

Le risque représente certes une situation dangereuse, mais se distingue des impacts par un mécanisme de transformation de ces situations dangereuses et en dangers variés qui s'étendent au cours du temps. Avec les résultats obtenus, il est possible de modéliser la prolifération des risques tout au long de la durée de vie de la mine avec les différents facteurs

ou paramètres qui occasionnent ces variations. Une des modélisations s’est faite en cinq (5) grandes étapes.

D’abord, une cartographie sommaire des risques possibles dans une mine à ciel ouvert (MCO) découlant de l’eau est dressée à la figure 7.1. La chaîne de production représentée sommairement en gris indique les opérations nécessitant l’eau, libérant les effluents et leurs influences négatives sur les facteurs environnementaux concernés.

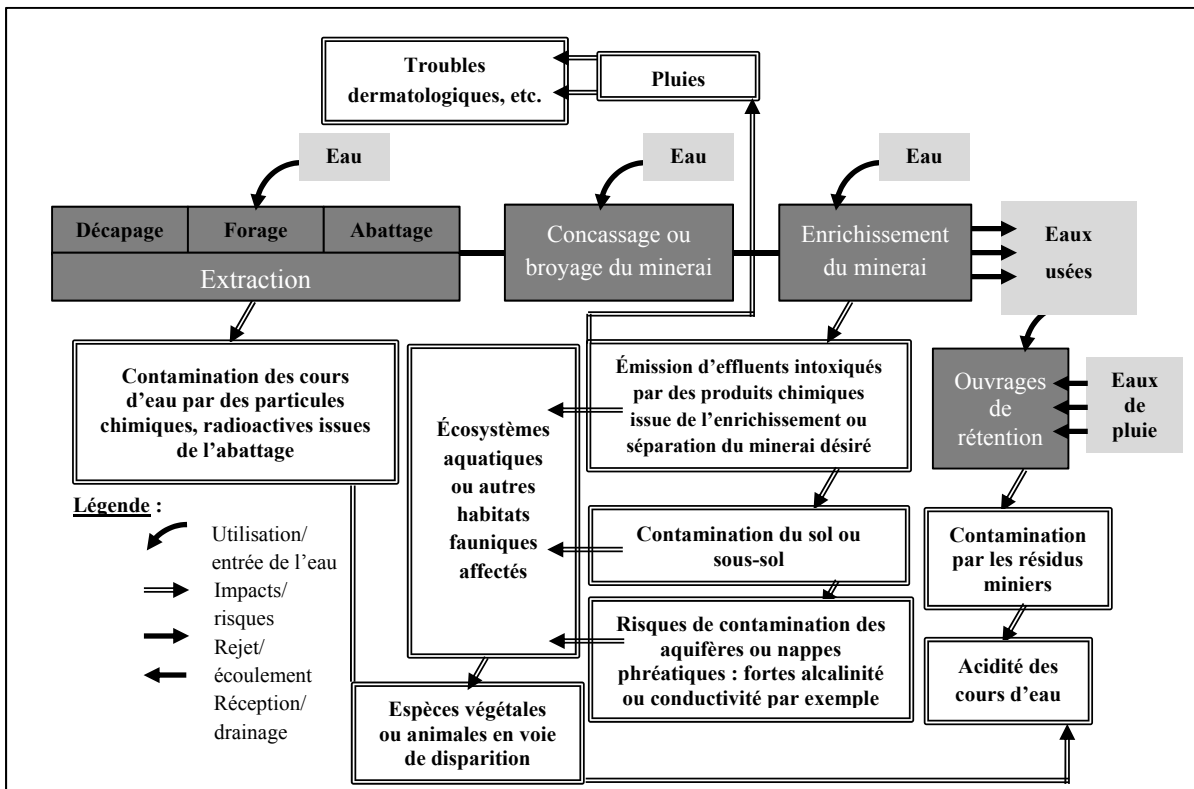


Figure 7.1 Schématisation sommaire des risques environnementaux liés aux ressources hydriques et aux ouvrages de rétention dans une MCO en cours de production

Ici, l’accumulation des eaux de pluie comme des effluents dans les ouvrages de rétention est un autre facteur de risque du système responsable de la survenance des risques environnementaux comme la contamination et la santé humaine affectée.

## 7.2 Évolution des risques environnementaux dans une MCO

En incluant la durée de vie de la mine, l'ordre d'apparition des risques et le temps, les risques liés à l'eau depuis la construction de la mine jusqu'à sa fin de vie est un récapitulé. L'illustration réalisée à la figure 7.2 permet d'observer un ordre approximatif d'apparition des risques. Les points rouges indiquent les risques. Sur la base d'une recherche historique, du système de gestion environnementale et des niveaux approximatifs de production, l'identification des risques environnementaux par la technique HAZID a été réalisée. Dans cette 2<sup>nd</sup>e étape, l'observation du comportement des points rouges caricature une non-linéarité d'apparition des risques dont la progression suit le développement de la mine. Ceux-ci évoluent avec la capacité de s'amplifier ou de rester constant selon l'intensité des influences. L'axe des X représente le temps (années) et l'axe des Y représente la production (%).

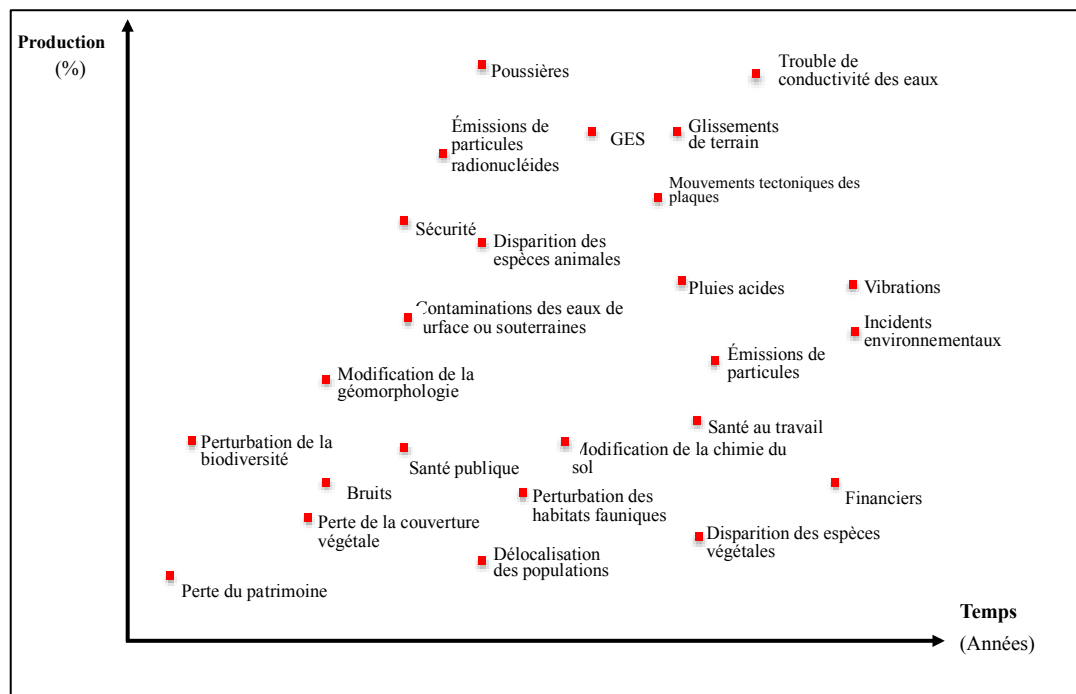


Figure 7.2 Cartographie temporelle et sommaire de quelques risques environnementaux encourus dans les MCO

Dans le cadre de l'extraction minière, la procédure requiert une série de consultations et la réalisation de l'ÉIE en dépôt de documents suivi d'un avis du gouvernement. La réalisation de l'ÉIE est une procédure importante en amont du projet, règlementée également avec des

mesures techniques définies pour encadrer la protection des écosystèmes susceptibles d'être affectés par les activités humaines. Il s'en suit selon la portée et la sévérité des impacts une audience publique qui avec les résultats des analyses de l'ÉIE va aboutir à un ensemble de décisions se traduisant en recommandations, en mesures d'atténuation et en un programme de suivi/surveillance pour la durée de vie de la mine. Traditionnellement, l'ÉIE réalisée au stade  $T_0$ , aide à contrôler ou maîtriser les risques potentiels et prédits. Mais les opérations minières se poursuivent au-delà de  $T_{n+p}$  alors, les décisions prises sur cette base traditionnelle n'empêchent pas la prolifération des risques et ne permettent pas un contrôle dynamique de ce système dont l'état varie continuellement.

En tenant compte de la notion d'évolution des risques, ce travail de recherche a pour but de mettre à nu un nouveau mode de gestion intégrateur de la variabilité dynamique des risques qui complexifient les situations déjà à risques. Certes les infrastructures ou les équipements changent peu, mais la pression, le volume de ruissellement, le climat, le marché boursier, la chimie des gisements une fois en contact avec leurs composants de l'air, la structure des digues changent et transforment les situations déjà à risque. Ainsi, tout changement engendre des risques et ceux-ci évoluent. Les risques se développent de différentes manières. Ils apparaissent de manière continue, s'intensifient ou apparaissent de manière discontinue comme la rupture des digues, tremblement de terre, etc. Cette recherche propose de réévaluer le système une fois la mine en opération avec ses paramètres modifiés par une évaluation environnementale continue (ÉEC) afin de rationaliser le suivi et l'analyse des risques. Dans ce cas, la prédiction des risques à long terme va se baser sur l'ÉEC régulièrement à court terme, mais, qui sera suivie chaque fois d'actions correctrices.

### **7.3 L'évaluation environnementale continue (ÉEC)**

La *redétermination* des facteurs environnementaux, des opérations minières, des valeurs numériques de l'importance/l'amplitude des risques est essentielle pour réaliser l'ÉEC. En se servant de la matrice pour non seulement faire une typologie exhaustive des risques et des impacts, une caractérisation raffinée des FE et des opérations minières comme première

contribution (Chapitre 4) a réussi une fois la MCO en opération, la projection des éléments ou facteurs, même sous-adjacents ou difficiles à entrevoir. Ceci, sous la forme expliquée d'ÉEC. L'ÉEC dans une 3<sup>e</sup> étape s'apparente peu au suivi environnemental qui est un plan découlant des conclusions directes de l'ÉIE sans analyses et observations préalables. L'ÉEC est une réévaluation de la mine qui va débiter à la phase de sa mise en opération en considérant les conclusions de l'ÉIE réalisée, la mise à jour des intrants/extrants, les mesures d'atténuation utilisées, les procédés opérationnels, l'évolution des paramètres, dont les risques, et les phases du cycle de vie de la mine à venir. À ce niveau, la décomposition du cycle de vie s'avère bénéfique pour faire l'inventaire des éléments du système, mettre en évidence les sources de risques et les facteurs affectés. André, Delisle, et Revéret (2004), 431p décrivent l'analyse du cycle de vie dans un premier temps comme l'évaluation de l'ensemble de la durée de vie de l'organisation/produit/service, incluant les opérations, la manufacture, la distribution, l'utilisation, le recyclage et leur fin de vie. Mais, dans la version (2010), 351p ils la limitent aux conséquences environnementales d'une matière tout au long de sa filière. Outre cette description, ce travail vient donc ajouter de nouveaux aspects à la notion de cycle de vie décrite par ces auteurs au niveau de l'inventaire avant l'analyse. Ici, cet inventaire devient itératif, car il implique une collecte des données du milieu dans tous ses états depuis  $T_0$  initial à la clôture en considérant les modifications continues au niveau des facteurs affectés dont les sous-facteurs et les procédés également. Par exemple, l'impact des changements climatiques sur la dégradation des sols d'une MCO en plus de l'acidification des eaux usées, l'intensité de la production stimulée par les marchés boursiers, de  $T_1$  à  $T_{10}$ , ce n'est pas pareil. L'effet de seuil et l'accumulation des incidences vont amplifier les impacts sur le milieu affecté comme la rupture de digues et des affaissements à la fois.

Alors, avec la capacité à suivre le comportement des risques au stade de projet, le temps dans les matrices dynamiques permet de prédire et observer leur évolution, les niveaux d'amplification, les facteurs aggravants et les facteurs plus sensibles ou catalyseurs. Ces matrices favorisent la communication interactive des informations sur les risques encourus qualitativement et quantitativement. L'analyse de sensibilité révèle d'ailleurs des disparités considérables entre les valeurs d'un facteur environnemental à la phase de projet et la phase

de mise en opération. Il devient évident d'affirmer que tous les composants environnementaux, les facteurs reliés, les types de risques d'une mine évoluent dans le temps et les phases du cycle de vie atteintes. L'application des mesures d'atténuation recommandées à l'ÉIE peut ne pas être efficace puisque les caractéristiques du milieu changent. De cette manière, ces matrices élaborées offrent un complexe détaillé pour construire des mesures préventives ou d'éradication précises. Force est de mentionner que Leopold, Clarke, Hanshaw, et Balsley (1971) ont identifié des limites à la méthode matricielle en annexant une fiche d'impact pour rassembler le maximum d'impacts possibles, qui n'ont pas été exploités ici. En effet, cette caractérisation est approfondie et les matrices obtenues sont une version améliorée dans le secteur minier. Cette caractérisation est issue du croisement des informations sur les facteurs environnementaux, les sous facteurs affectés de ces derniers selon la phase atteinte et les opérations de la phase d'exploration jusqu'à la phase de clôture en passant par la phase post-ÉIE qui marque la réalisation de l'ÉEC. L'ensemble des risques potentiels découlant est un volume important de possibilités de risques représentant ce secteur d'activité et fidèle aux paramètres de ces industries. Elle s'est établie sur les principes historiques de Léopold, les études d'impact de MCO réalisées puis approuvées, des rapports techniques de différentes firmes, des recherches scientifiques orientées sur l'identification de risques dans les MCO et publiées. Ainsi les matrices élaborées offrent une meilleure connaissance des mines tel que construites aujourd'hui.

Une conclusion importante de cette première contribution est que la matrice de Léopold est l'appropriation par analyse croisée des principes de réalisation d'ÉIE, intègre facilement le temps et peut s'incorporer aux principes des systèmes dynamiques. Une recommandation aux gestionnaires est de mettre à jour régulièrement la grille de risques en fonction de leur milieu, accroître les opérations rigoureuses de surveillance et d'appliquer une maintenance rigoureuse au moindre signe d'altération ou dégradation. Ainsi, leurs programmes de surveillance environnementale doivent s'échelonner et se répéter sur toute la durée de vie avec plus de rigueur (légal comme technique).

Avec l'intégration du comportement des risques, la succession d'évaluations, le transfert de données (qualitatives comme quantitatives) sur les risques, l'évaluation environnementale subit donc une mutation. Elle se dissocie de sa constitution statique traditionnelle pour



s'apparenter ici à une procédure plus dynamique. La pluralité des risques encourus (dont la portée s'amplifie), la diversité des caractéristiques géologiques comme des facteurs environnementaux, la sensibilité des sources de risques et la variété des opérations minières exposent mieux les limites de la procédure actuellement utilisée donnant la préférence pour l'incorporation du temps, donc des systèmes dynamiques.

Depuis 1961, la dynamique des systèmes a été utilisée avec succès dans la gestion opérationnelle minière sauf en environnement. Elle a pourtant des capacités démontrées au Chapitre 5 sur la représentation dynamique, les techniques dans le traitement de problématiques multicritères et multidisciplinaires. Son principe permet de :

- renforcer la prise en compte des facteurs et paramètres responsables d'incertitudes;
- produire une représentation dynamique avec les différentes interactions existantes;
- suivre l'évolution des phénomènes dans le système;
- et, offrir également la propriété de production de l'analyse dynamique.

En transposant ces éléments à la gestion environnementale, ce principe vient compléter valablement les objectifs de l'évaluation environnementale en facilitant non seulement l'évaluation des risques potentiels, mais en caractérisant surtout les variables dynamiques pour maintenir un niveau optimal de performance environnementale. Un autre avantage, c'est la capacité de visualisation numérisée de ces données grâce à la modélisation. Le compromis gagnant qu'offre l'association des systèmes dynamiques à la gestion environnementale minière est ainsi exposé.

En considérant les relations de cause à effet, les concepts d'interaction et de rétroaction, le diagramme de boucle de causalité (DBC) élaboré dans la troisième contribution (Chapitre 6) intègre les différents liens associés au processus de gestion environnementale minière de l'eau. Le diagramme est réalisé avec Vensim. Chaque fléchette du diagramme ci-bas indique soit une rétroaction d'influence positive (+) ou négative (-) d'un élément sur l'autre, décrite au chapitre 3 et les boucles de rétroaction traduisent un phénomène. Les relations de cause à effet s'établissent entre les actions, les opérations et les conséquences. Par exemple, la présence du gisement affecte les besoins en minéraux, ces derniers affectent la production, etc. Une telle représentation facilite la description et la compréhension de la synergie dans

laquelle se trouve le SGE minier étudié. À cette 4<sup>e</sup> étape, ce diagramme à la figure 7.3 montre, l'existence de relations interactives linéaires et non linéaires qui illustrent, un système dynamique assez complexe. L'interdépendance des éléments affichés à plusieurs niveaux a permis de clarifier les causes ou les effets existants et de comprendre les comportements observés.

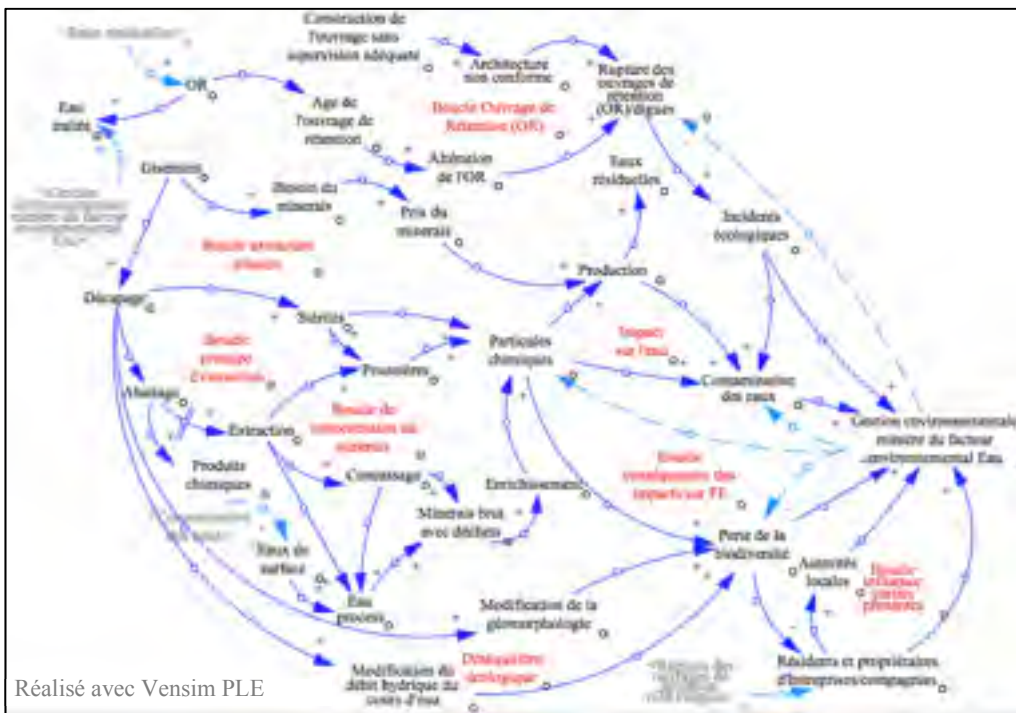


Figure 7.3 Diagramme de boucle de causalité de la GEM autour de l'eau

L'ÉIE facilite l'analyse des interactions du système, mais contrairement au diagramme de boucle de causalité (DBC), l'ÉIE ne permet pas d'afficher en un élément l'ensemble de la mine dans son fonctionnement ne serait-ce que sur un support visuel. En réalisant le DBC, les interactions peuvent être identifiées et affichées. Les variables et probabilités grâce à l'intégration des rétroactions ont pu être déterminées et de la même manière la déduction des indicateurs requis est facilitée. Ceci montre encore la complémentarité entre la procédure d'évaluation environnementale et les systèmes dynamiques, qui serviraient de plateforme bénéfique pour le développement de meilleurs outils de gestion de ces risques. En attendant, ce travail montre que les systèmes dynamiques favorisent 1) l'illustration des processus; 2)

l'identification et l'affichage des facteurs comme des variables, 3) l'analyse multicritère, 4) la détermination des risques; 5) les collaborations multiples; 6) le suivi ainsi que la surveillance; et, 7) sert d'aide à la décision. Ensembles, ils favorisent la réalisation de l'analyse dynamique (Chapitre 6) et montrent la densité des interactions. Toutefois, l'identification des risques ne représentant pas une mesure de mitigation du risque, il faut l'associer à des prises de décisions et à l'application de mesures correctrices dans une 5<sup>e</sup> étape représentée à la Figure 7.4.

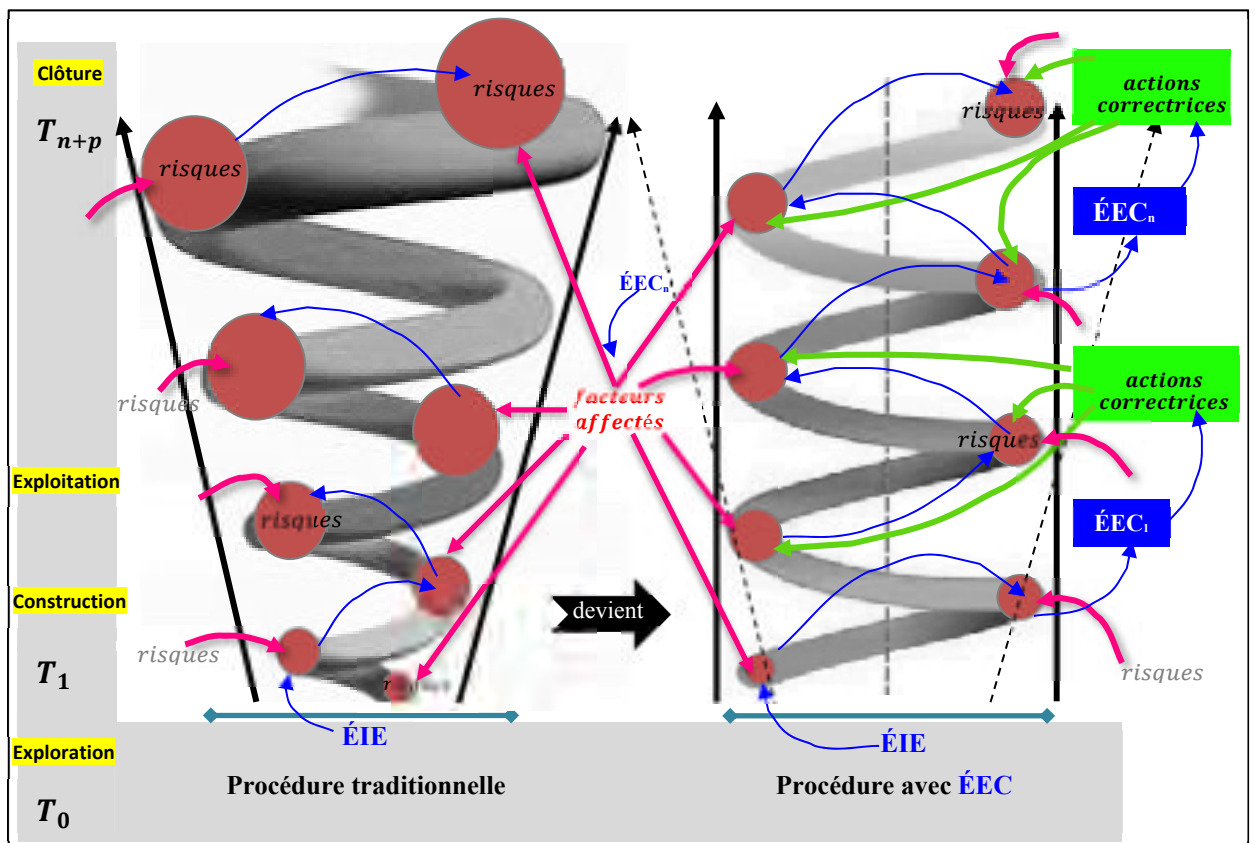


Figure 7.4 Vision systémique de la proposition de recherche sur la GEM dans une mine

Le système complexe où se situe la MCO se compose de diverses sources de risques avec des variables dynamiques qui malgré la réalisation d'une ÉIE et de l'application des mesures d'atténuation ne cessent de générer une variété de risques toujours plus importante. La figure 7.4 à gauche illustre cette évolution graduelle du volume de risques (boule rouge) au cours de la durée de vie de la mine sous la forme d'une hélice. Il faut remarquer que rétroactivement,

l'impact des risques influence les risques de sortes à amplifier l'effet ou développer d'autres formes de risques. Le but étant de maîtriser ou contrôler au mieux ces risques, cette étude propose une procédure avec l'ÉEC après la réalisation de l'ÉIE. Ceci pour rééquilibrer le volume des risques afin qu'ils ne prennent pas de proportions plus importantes et faire disparaître leur évolution ouverte en forme d'entonnoir. Dès l'application des mesures issues de l'ÉIE le suivi qui s'en suit permet de réaliser l'ÉEC. Cette dernière consiste à faire une évaluation du milieu tel que expliqué à la section 7.3 et à appliquer des actions correctrices (en vert) à chacun des niveaux d'évolution de la mine jusqu'à sa clôture. Par exemple, la mise en place de sensors dans la structure de l'ouvrage de rétention peut permettre de suivre l'altération des propriétés de la structure et le volume d'eau dans le bassin. À ces mesures doit se rajouter la collaboration avec les experts en géotechnique pour évaluer les structures internes et le niveau des risques liés aux ouvrages de rétention pour prendre les décisions requises. Quelques simulations mathématiques pour réduire le coût des travaux peuvent aussi être établies et suivies afin de prédéterminer d'avance les niveaux d'eaux usées à ne pas dépasser dans les bassins. La figure 7.4 à droite montre que les risques existent certes mais leurs impacts sont mieux maîtrisés.

Globalement, cette thèse démontre l'importance de l'intégration du temps aux outils de gestion environnementale, et ceci pour améliorer la procédure environnementale existante. Les résultats montrent aussi la nécessité de mieux connaître ces organisations en mettant à jour la caractérisation de leur composition en paramètres environnementaux/opérationnels, en mettant en œuvre les mesures alternatives pour les ouvrages de rétention, car l'eau se révèle être une source diffuse d'une variété de risques comme le reste des facteurs environnementaux probablement. Par ailleurs, les conclusions insistent sur la répétition rigoureuse des programmes de surveillance et la proaction des gestionnaires au moindre signe d'altération des facteurs environnementaux ou des infrastructures ou de modification du comportement des risques. En conséquence, les épisodes de rétroactions doivent être impliqués, car ils se révèlent importants dans ces systèmes intégrés. L'analyse dynamique a ainsi permis de mieux comprendre le comportement des risques, la transformation des facteurs environnementaux en plusieurs sous-facteurs et l'harmonisation de ces données au niveau des MCO. Implicitement, cette thèse a révolutionné l'identification ou la

détermination des risques, de leurs sources, des facteurs aggravants et les moyens de régulation entre les parties prenantes dans tout milieu aussi complexe que celui des mines.

#### **7.4 Retombées scientifiques et industrielles de la thèse**

Avec l'évolution actuelle des technologies d'information, ce travail favorise une communication appropriée entre les parties prenantes en réduisant l'opacité (actuellement connue) des données grâce à la numérisation des risques et de leurs caractéristiques. L'idée n'est pas de substituer la méthodologie de gestion environnementale existante, mais de la renforcer avec un système capable de contenir la densité des données, des facteurs interagissant, les éléments temporels et de révéler la probabilité d'occurrences des impacts, dont les expérimentations de type « Et si ? ». Les incertitudes selon l'intensité de l'ensemble des opérations pourront être exposées et le suivi rigoureusement réalisé. Elle offre un cadre de modélisation optimal qui devient un tableau de bord pour l'identification des risques sur la base duquel les gestionnaires et investisseurs peuvent prendre des décisions. Elle permet d'orienter les perspectives du système de gestion environnementale et d'assurer la non-fragmentation temporelle de la gestion des risques. Une fluidité offerte grâce à cette numérisation des informations interactives du système. L'exploitation minière est une source de revenus importants et un indicateur de performance financière pour les investisseurs et gestionnaires miniers. Les gestionnaires peuvent l'observer et l'utiliser pour optimiser leurs performances financières. En favorisant une vision globale des facteurs environnementaux qui influencent la mine, sa structure, l'environnement, dont les parties prenantes, ces travaux servent de tableau de bord et de pont à l'engagement social et de gouvernance des gestionnaires. Il s'agit là d'une alternative nouvelle d'évaluation dynamique avec un niveau de prévention avancé et des données basées sur des considérations temporelles des opérations minières où différentes expertises vont collaborer. De plus, ce travail permet de réduire les coûts associés à la correction des dommages une fois qu'ils sont apparus en entretenant mieux les paramètres du système à préserver en amont.

D'un point de vue méthodologique, le processus successif d'évaluations des risques depuis  $T_0$  à  $T_{n+p}$  peut se décrire comme une démarche interactive où chaque décalage mène à d'autres évaluations environnementales continues des risques. Ceci, pour la :

- prise en compte de tous les facteurs environnementaux ainsi qu'opérationnels;
- renforcement les pratiques de protection environnementale et de la législation;
- l'amélioration continue de la gestion environnementale minière et l'adéquation des organisations aux normes internationales (ISO 14000, 31000, CSA Z1000, etc.).

D'autres retombées se trouvent au niveau :

- de la capacité de participer en temps réel à la résolution des risques;
- de la détermination plus précise des facteurs influents, des amplificateurs de risques sources des situations à contrôler et surveiller;
- de l'élaboration de matrices sous la forme évolutive dynamique, la détermination de l'occurrence des risques (amplitude, importance, probabilité);
- de la détermination numérique et qualitative des risques qu'ils soient insignifiants ou plus importants. Les impacts déterminés peuvent être individuels, séquentiels, numériques, qualitatifs ou subjectifs;
- de meilleures prises de décisions opérationnelles par les gestionnaires et sur les ressources naturelles;
- du volume réduit des rapports produits et de la facilité à mettre à jour régulièrement les données interactives ou rétroactives ou interdépendantes entre facteurs de risques environnementaux.

Les résultats étant variés, leurs applications vont prendre diverses formes. Certains vont rester sous forme d'hypothèses, d'autres vont permettre l'approfondissement des réflexions sur les autres facteurs environnementaux. Il faut mentionner que la méthodologie utilisée n'est pas figée. Les chercheurs pourraient représenter différents modèles pour des fins d'approfondissement pour un système similaire ou une mine souterraine, artisanale ou profonde. En travaillant sur le facteur de l'eau, les retombées de cette recherche s'adaptent aussi aux mines souterraines, car les facteurs affectés sont pareils d'un processus

d'exploitation à un autre (section 2.2). Par exemple, dans les deux (2) cas, les eaux usées sont récupérées puis traitées. Dans les mines souterraines, les gisements sont extraits en profondeur certes, mais ils sont transformés en surface comme dans le cas d'une mine à ciel ouvert (MCO).

## 7.5 Perspectives

Les recherches effectuées sur les MCO se sont concentrées sur un seul facteur environnemental (l'eau) alors qu'il en existe huit (8). L'approche proposée n'est donc pas complète. Une extension des matrices ou des résultats à l'ensemble des autres facteurs environnementaux permet d'obtenir un modèle complet pour une continuité logique de ce travail et la maîtrise systémique des vecteurs de risques imbriqués. Ainsi, les résolutions proposées pourront s'étendre à des systèmes plus complexes du point de vue structure, taille et fournir de nouvelles perspectives de recherche pour des solutions durables. L'investigation sur le facteur de l'air ou de la santé par exemple est un prochain point de départ intéressant, car ces éléments sont des sources de risques portant atteinte à la santé humaine. En juxtaposant par exemple des éléments d'incertitudes de l'air : une étude similaire permettrait de mieux circonscrire les enjeux géothermiques ressentis par les travailleurs et ceux collatéraux aux opérations puis à la santé-sécurité du travail (SST). Ces problématiques atmosphériques dues à la qualité de l'air respiré, l'émission de particules respirables nuisibles, la pression dans le cas des mines souterraines, les variations de température, etc. sont aussi sources d'épidémies, de maladies ou de lésions physiques. Les problématiques dues aux maladies, aux lésions professionnelles, aux accidents ou aux incidents subis, sont autant de conséquences à limiter ou contrôler.

En faisant ressortir la faisabilité de la combinaison des systèmes dynamiques à la gestion environnementale, une autre perspective de ce travail est d'enrichir les données disponibles, de susciter des investigations approfondies plus abondantes en gestion environnementale des mines et de contribuer à l'harmonisation de la terminologie du «*management*». Ce terme *management* ayant évolué en intégrant au sens global la gestion de l'environnement comme

du risque, il s'utilise désormais aussi bien en anglais qu'en français ce qui doit être clarifié. Par ailleurs, il faut noter que les solutions développées sont capables de varier selon la particularité de chaque mine, des contraintes régionales, du type de minerai, de l'écosystème et de l'orientation méthodologique de l'investigateur.



## CONCLUSION

Les modèles actuels de gestion environnementale présentent des lacunes. L'utilisation de nouvelles technologies et des produits chimiques durant les opérations, continue d'avoir des impacts non résolus ou en émergence malgré les études d'impacts réalisées. La littérature consultée s'est avérée pertinente sur les risques environnementaux, leurs enjeux, les systèmes dynamiques et leurs applications concrètes. Ces démarches ont mis en évidence la problématique étudiée. La principale hypothèse étant de savoir si les matrices et la simulation rendent dynamique l'ÉIE la notion d'évolution des risques de  $T_0$  à  $T_{n+p}$  est pris en compte. Effectivement, le risque existe, mais il évolue ou se transforme selon les facteurs, les opérations, les modifications produites, les fluctuations subies avec lesquels il entre en contact. Dans une mine, il peut s'agir des changements climatiques avec les pluies acides ou de la production (marché boursier) qui obligent à plus de production donc une altération plus importante. L'évolution des risques expose alors le besoin d'une surveillance accrue des facteurs concernés et des paramètres impliqués par des mécanismes ou outils afin d'adopter les mesures appropriées. Pour ce faire, il faut des études régulières pour ramener l'interrogation (où en sont les risques?) et déterminer ensuite les actions correctrices correspondantes sous la forme d'évaluation environnementale continue (ÉEC) jusqu'à la fin de vie de l'usine.

Le thème sous-jacent de cette recherche est donc de parvenir à ce mode de gestion qui intègre les variations dynamiques des risques environnementaux d'une mine à ciel ouvert (MCO) et de les contrôler grâce aux actions correctrices régulières. À ce propos, l'association des systèmes dynamiques après la procédure d'ÉIE permet de réaliser cette gestion optimale et numérisée de sorte à donner aux gestionnaires miniers un accès direct aux analyses. Par exemple, en passant en revue les valeurs qualitatives et quantitatives des risques obtenues, les matrices alertent plus tôt les gestionnaires qui peuvent agir en amont dès les premiers signes de dégradation, et ce, régulièrement jusqu'à ce que le risque ne représente plus un danger. Sommairement, ce travail a fait l'objet de trois (3) articles de revues scientifiques soumises et publiées, en plus de quelques présentations orales approuvées.

À travers les articles publiés (chapitres 4, 5 et 6), il a été mis en évidence les facteurs environnementaux inconstants ou imbriqués au cours des opérations et un mode de gestion proposé. Celui-ci intègre le temps et les paramètres aussi bien environnementaux qu'opérationnels. À ces paramètres s'ajoutent les notions d'interaction, de rétroaction (notions des relations de cause à effet) et les sous-facteurs affectés selon la phase du développement de la mine atteinte. L'étendue de ces travaux entrepris aura permis d'apporter des contributions originales dans plusieurs domaines d'application de l'industrie minière. Il s'agit de : l'évaluation paramétrique de l'environnement minier, la modélisation matricielle tout au long du cycle de vie, la catégorisation des facteurs dans ce système de production, l'analyse environnementale dynamique des paramètres, la catégorisation des facteurs environnementaux, la modélisation dynamique par un diagramme de causalité et la gestion environnementale minière dans son contexte aléatoire, mais dynamique.

Ce travail de recherche s'articule autour de l'intégration de la variabilité des risques qui changent continuellement à cause des phénomènes divers (climatiques, boursiers, chimiques, humains, etc.) et la nécessité d'analyser l'occurrence des impacts. Cette thèse a donc proposé un outil de rationalisation des analyses de risques de sorte à ne pas obliger les gestionnaires à la reprise d'études environnementales coûteuses, mais des travaux de contrôle des paramètres environnementaux. Ceci sous forme d'analyses dynamiques de sorte à maintenir une structure de gestion des risques conforme aux objectifs de l'ÉIE produite initialement et rendre le système moins vulnérable.

Dans une perspective d'approfondissements ultérieurs, il faut faire attention à la variabilité des facteurs environnementaux et opérationnels des mines qu'ils soient à ciel ouvert ou pas. Quel que soit le cas, les opérations, les interactions et la multiplicité des facteurs constituent des obstructions interdisciplinaires à la réalisation de modèles qui doivent fidélité à la réalité. Cependant, il faut réaliser d'abord ce travail sur les autres facteurs environnementaux puis mettre régulièrement la catégorisation des facteurs de risque et des facteurs opérationnels à jour.

## ANNEXE I

### STRUCTURE DES PARAMÈTRES ET FE CONSIDÉRÉS

Tableau A I-1 : Paramètres et facteurs environnementaux (FE) considérés dans les rapports techniques 43-101, d'ÉIE et de recherches sur les mines à ciel ouvert (MCO)

	43-101	Étude d'impact environnemental (EIE) Rapport 301 (BAPE)	Développement Durable (DD)
Milieu biophysique	Ressources culturelles		
	Accessibilité	Étendue du milieu d'étude concerné et influencé	Évaluation de la performance économique Indicateurs des impacts économiques de l'organisation Étude du marché et son influence
		Évaluation de la zone d'implantation du projet et des projets industriels autour avec lesquels l'organisation à l'étude pourrait interagir	
	Topographie ; Géomorphologie : formations rocheuses, altitudes et autres formations		
	Paysage	Maintien de la biodiversité et des sols : mesures et amélioration continue (AC)	
Flore et végétations	Couvert végétal, milieux sensibles ou humides et espèces en voie de disparition		
Faune	Espèces menacées		
Climat	Précipitations ; Saisons ; Vents ; Températures Données sur de longues périodes jusqu'à 97 années (Beauregard, Gaudreault, & D'amours, 2013)		
		Climat sonore : sources, typologie en fonction des fréquences, étendue et modélisation si possible	
		Qualité de l'air : Émission, expositions et nature de l'exposition. Surveillance et mesures d'atténuation	Production responsable et recyclage
Géochimie	Chimie du sol et sous-sol Nature de la minéralisation		
Hydrogéologie	Typologie des aquifères dans la zone à l'étude		
		Possibilités de contamination des eaux de surface ou souterraines et sources de contamination Drainage des eaux dont les eaux usées et gestion	

	43-101	Étude d'impact environnemental (EIE) Rapport 301 (BAPE)	Développement Durable (DD)
Hydrologie	Cours d'eau de surface et souterrains		
Géologie	-Minéralisation Mode de dépôt -Estimation du gisement		
Sols		Nature et typologie s'il y a lieu	
Géotechnique		Stabilité des sols ; Compression des sols ; Consolidation des fondations pour la prévention des glissements ou autres formes d'accidents géologiques	
Milieu social	-Ressources locales -Main d'œuvre disponible -Infrastructures existantes -Impacts socio- économiques	Intégration de l'audience publique Consultation et communication avec la communauté locale sur le projet minier Évaluation des impacts socio-économiques	Respect des droits humains et des valeurs culturelles  Contribution au développement socio- économique et communautaire
Impacts et risques	Gestion des déchets		Santé et sécurité (SS) : Mesures et AC
		Gestion des stériles et eaux usées/contaminées	Gestion intégrée des risques : environnement + social + économique
		Énumération des impacts, des variantes pertinentes ayant des impacts	Performance environnementale : Mesures et AC
		Gestion des risques	Sur la base des travaux de ICMM (2003) et (Kogel et al., 2014)
		Surveillance environnementale	
Mesures		Mesures d'atténuation des impacts	Intégration du DD à tous les stades des prises de décisions dans l'organisation
		Mise en place des mesures d'urgence	
Réhabilitation de la zone d'extraction		Planification, type de remédiation et coûts associés	
Éthique			Politique sur l'éthique commerciale
			Transparence avec les parties prenantes dans toutes les actions de la mine

## ANNEXE II

### PRÉSENTATION ORALE À L'ACFAS

84<sup>e</sup> congrès de mai 2016



# ANALYSE DYNAMIQUE DE LA GESTION DES EAUX USÉES DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE

## Représentation temporelle des risques

**Mondoukè S. B., Lagnika**  
Doctorante, ÉTS, Montréal

Superviseurs: R. Hausler & M. Glaus

84<sup>e</sup> congrès de l'Acfas, Mai 2016



## **ANNEXE III**

### **L'EAU, ENJEU ENVIRONNEMENTAL MULTIDIMENSIONNEL**

Les réactions des facteurs environnementaux sur l'échelle de temps sont multiples et transforment d'autres FE en véritables dangers conformément aux résultats obtenus aux chapitres 4 et 6. Les organisations minières font des efforts pour mieux s'accorder aux principes du développement durable malgré la subsistance de certains risques environnementaux. De plus en plus, elles sont organisées de sorte que les eaux usées sont drainées et recueillies simultanément dans les ORs pour faciliter l'accessibilité aux sites pour l'extraction et la production. Dans ce sens en 2011, de 8,9 millions de m<sup>3</sup> Agnico Eagle Limitée est passée à 7,2 millions de m<sup>3</sup> en 2012 comparativement aux années précédentes où elle consommait 20% de plus (Grondin, 2012). L'augmentation de la recirculation des eaux usées au cours de la production est exercée pour réduire l'introduction de l'eau fraîche réservée pour d'autres consommations ultérieures et domestiques en est un exemple, mais les conséquences continuent. Les prochaines sections dans un premier temps, vont d'ailleurs servir d'éclairage à ce propos afin que tout lecteur soit capable de fixer la position de ce facteur dans les industries. Ensuite, il serait intéressant de savoir si le processus de GEM est opérationnel. Des critiques dans la littérature à propos de la surveillance de la structure des ORs ont été considérées sans vouloir s'attarder aux éléments de conception génie civil et géotechniques développées par M. Aubertin et al. (2013) et bien d'autres chercheurs.

#### **Les ouvrages de rétention (ORs) et enjeux environnementaux**

Depuis des décennies, l'évolution des exigences autour du rejet des effluents finaux pousse les industries, dont la plupart des minières à construire des ORs qui permettront soit de traiter les eaux résiduelles avant leur émission dans la nature ou d'éviter toute interférence en les conservant dans ces bassins de retenue. Véritables œuvres d'art selon Marche (2008), ces

ouvrages de rétention (ORs) retiennent des volumes d'eau impressionnants, mais étant issus de technologies anthropologiques, elles sont faillibles avec ou sans rupture telle qu'elles sont expliquées plus bas à la figure 6.4. En Chine, sur plus de 85000 ORs, on signale au moins 3400 ruptures depuis 1954. En effet, l'APEG (2013) en Colombie-Britannique affirme que les conditions de ces ouvrages changent en fonction de l'âge de l'ouvrage et les matériaux ayant servi à sa construction se détériorent. Dans le monde, d'autres effondrements ou ruptures de bassins de résidus miniers ont eu lieu également : aux USA (1972) à Saunders d'une mine de houille et à Gallup (1979) d'une mine d'uranium et de thorium, en Italie (1985) à Stava, en Espagne (1998), en Suède (2000) et en Philippines (2002) et à Kolontar en Hongrie (2010) dans une mine d'aluminium. Certes, il y a eu plus d'incidents avant les années 2000, mais Azam et Li (2010) exposent la fréquence et la gravité importantes de ces ruptures qui surviennent encore de nos jours malgré les mesures en place. Effectivement une gestion déficiente des eaux usées dans les ORs ou l'altération de la structure de ces ORs, causent encore des ruptures et incidents écologiques considérables comme celui de Germano (2015) au Brésil.

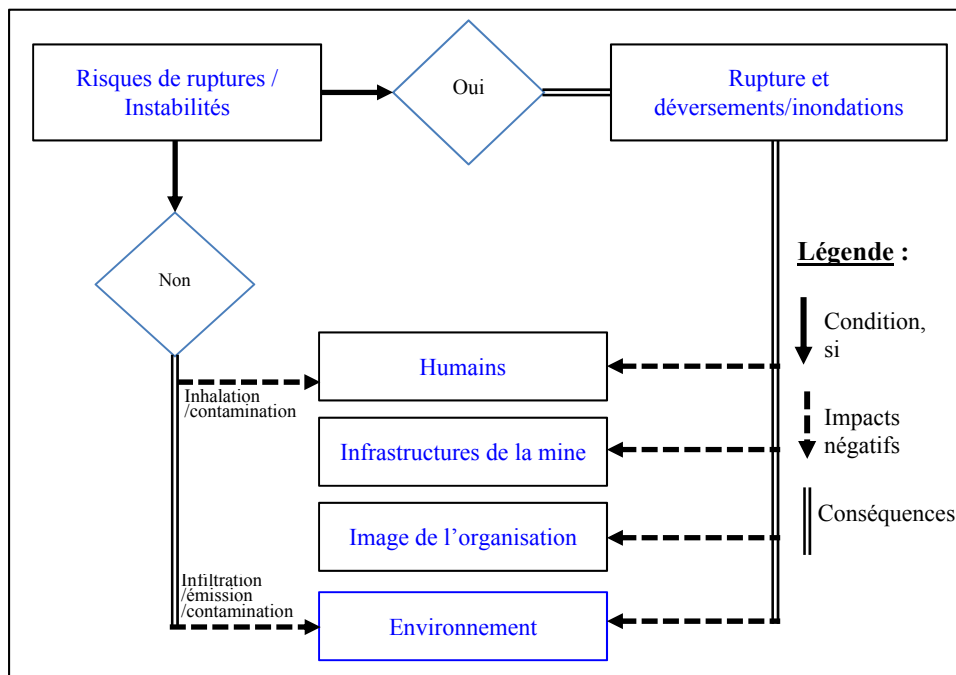


Figure A IV-1 : Conséquences des ouvrages de rétention sur l'écosystème avec ou sans instabilités et ruptures



C'est la raison pour laquelle Marche (2008) affirme que la sécurité des ORs et la gestion des risques font partie des tâches courantes des industries dépendantes de ces infrastructures.

L'illustration à la Figure A IV-1 montre comment les ruptures peuvent être assimilées à des instabilités avec de lourdes conséquences sur l'environnement, ses composantes et la réputation des organisations. Ainsi graduellement avec toutes les irrégularités constatées et les accidents enregistrés, la gestion des risques environnementaux constitue une préoccupation importante. Plusieurs investigations sont amorcées afin de comprendre et résoudre ces instabilités en analysant la procédure de gestion environnementale et les facteurs de risques.

### ***Facteurs d'instabilité***

Élément essentiel aux opérations, l'eau est considérée comme un vaste système où les éléments influents sont : le type d'exploitation, le mode de minéralisation, les contaminants, le traitement des minerais et la composition des roches. Mais ce sont ces mêmes éléments qui font partie des sources de détérioration des ouvrages de rétention (ORs) et de plusieurs troubles environnementaux. Récemment M. Aubertin et al. (2013) ont attribué une des raisons aux instabilités, à l'absence de suivi régulier de ces ORs en période de production, car la majorité des ruptures à près de 80% surviennent à ce moment. Une recommandation serait d'accroître le suivi dont une maintenance appropriée des ORs tout au long de la durée de vie des mines jusqu'en fin de cycle. Généralement les ORs se composent d'un concentrateur et de digues, mais ces auteurs ont remis en cause le facteur de sécurité acceptable des digues qu'ils décrivent comme probabiliste. En effet, ces nombreux facteurs d'instabilité peuvent varier selon des paramètres complexes ou caractéristiques incertaines présentés dans le tableau A IV-1. Mais, le suivi invariablement s'il est exécuté et pris en compte, facilite la mise en œuvre immédiate des mesures requises à la maintenance.

### ***Réduction du risque d'instabilité et investigations effectuées***

Les moyens techniques, géotechniques et les recherches en ingénierie ayant évolué, les statistiques montrent que les probabilités de rupture de barrages de tout type diminuent, mais un risque résiduel persiste. Ce risque résiduel n'est souvent pas négligeable puisqu'on peut y

enregistrer des pertes de vie animale, humaine et végétale. Azam et Li (2010) dans leurs récentes études mettent en évidence qu'il y a eu plus d'incidents avant les années 2000, mais la gravité de la rupture des barrages de rétention de boues toxiques de la mine Germano en novembre 2015 remet cette affirmation en question.

Tableau A IV-1 : Facteurs d'instabilité des ouvrages de rétention (ORs)

Typologie de l'ouvrage de rétention	Paramètre physique	Caractéristique
Concentrateur	Stabilité physique	Matériau de construction
		Teneur initiale en eau
		Faible conductivité hydraulique
Digue	Évaluation en cas de submersion de la crête par une crue	Particules dans l'eau, du vent
	Érosion du matériau dans la digue	
	Érosion du matériau dans la fondation	Typologie des matériaux utilisés pour contenir les rejets des concentrateurs
	Pressions élevées et en surface	
	Sollicitations dynamiques	

Effectivement, cet incident (additionnel à ceux précités) avec un déversement de 60 millions de T (tonnes) et au moins 17 vies humaines perdues au Brésil, vient rappeler qu'il y a une urgence à prévenir les catastrophes écologiques dues à la stabilité défaillante de ces ORs. De plus, Tannant (2015) explique qu'après même plus de 50 ans de vie et l'explosion démographique, la probabilité de ces ruptures tend à s'élever avec plus de possibilités de pertes en vie humaine. Cet état de choses moins acceptable en cette «ère des progrès spectaculaires» a conduit à plusieurs investigations scientifiques comme ceux de Kalantari et al. (2013) et Ben-Awuah (2013). D'autres travaux sur la cause de ces ruptures sur les matériaux de construction et les matériaux renforçant l'étanchéité de ces ouvrages ont ainsi été parcourus pour approfondir les investigations (Cantré & Saathoff, 2013; Erol, 2010; Ishihara, Ueno, & Yamada, 2015; Javadi, 2012). Mais, décrit comme un processus à variation temporelle, le risque de rupture a suscité en Colombie-Britannique d'autres formes de réflexions en 2010 parmi lesquelles, de nouvelles mesures dans le programme de sécurité

des ouvrages de rétention (ORs). Ce programme insiste désormais sur un processus d'inspection et de surveillance approfondi et se décompose comme suit : 1) la soumission des ORs aux examens périodiques ; 2) l'inspection annuelle et la correction s'il y a lieu des carences ou dommages ; 3) la surveillance régulière et la soumission des plans d'urgence. Également, les anomalies ou détériorations observées dépendamment de leur incidence sur la vulnérabilité de l'ouvrage et la protection de l'environnement doivent être corrigées à court ou moyen terme. Au terme de ce travail, ce régime provincial canadien a exigé la révision de la politique de gestion environnementale des ouvrages de rétention (ORs).

Effectivement les résidus miniers et leurs caractéristiques physicochimiques s'associent facilement à l'intégrité des parois des ouvrages et dégradent graduellement leurs propriétés. On comprend donc que les ORs selon les caractéristiques géotechniques complexes constituent un assemblage de matières dont la stabilité dépend des FE, du suivi, du mode gestion et de la maintenance. La réduction des risques d'altération voire de rupture étant une réalité toujours d'actualité, il est important de penser aux moyens de résolution pour non seulement préserver l'écosystème, mais transformer de façon optimale les procédures existantes. Alors, sans vouloir s'attarder aux éléments de conception génie civil et géotechniques développées par M. Aubertin et al. (2013) et bien d'autres chercheurs, ce travail s'est rapproché des résultats de Tannant (2015). Il est aisé de conclure que la sécurité ou stabilité des ORs est le résultat de démarches techniques aussi exigeantes que leur conception et leur construction. Leur exploitation devrait inclure des procédures de gestion environnementale et de suivi plus rigoureuses.

### ***Surveillance environnementale des ouvrages de rétention (ORs)***

Dans l'objectif d'uniformiser les pratiques en gestion des résidus miniers au Québec, les méthodes d'analyse de la stabilité des ORs de même que les critères de conception sont régis selon la directive 019 du MDDEFF principal outil de référence, le guide du MPN et le code du bâtiment Eurocode. Dans l'annexe 3 du règlement sur la sécurité des barrages, le suivi rigoureux de la structure des ORs est normalement exigé dans la province. Les ORs y sont classés en fonction de leur vulnérabilité, la mesure des conséquences de rupture et quelques variables. Cependant, les activités de surveillance réparties sous forme d'inspection et visites

de reconnaissances ne s'appliquent pas aux ouvrages de rétention (ORs) dont le niveau d'impact d'une rupture est minimal. La valeur de ce minimal étant fixé à  $P \approx 0$  et appartenement à la catégorie E. Lorsque le niveau de conséquence n'est plus minimal, ces activités de surveillance exigées ne font donc pas partie des pratiques intégralement respectées par les gestionnaires. Une faille qui pourrait expliquer certains des incidents survenus dans le monde ces dernières années. Pourtant, les minières sont conscientes des enjeux liés à la gestion des rejets miniers. Elles planifient d'ailleurs leurs opérations de sorte à minimiser l'importation de matériaux devant servir à la construction des ORs et construisent des ouvrages selon les conditions géotechniques requises pour réduire les risques environnementaux, mais peu d'attention est accordé aux modalités d'inspection des ORs, leur entretien en absence de risques considérables et à la détermination du nombre requis d'ORs selon la catégorie de mine qu'il s'agit. Par exemple, Heimrich (2012) dans le rapport de la firme SM Inc. décrit leur plan de gestion des eaux retenues du barrage Hollow Glen en fonction : du réseau hydrographique, du niveau des eaux, des débits, du seuil de débordement ou d'inondation, du niveau de crue de sécurité, du type d'évacuation et des mesures prises. Un tel mode de gestion de ces infrastructures est insuffisant s'il faut tenir compte de l'impact qu'elles ont en cas de rupture et de l'évaluation de la sécurité d'un tel ouvrage. Pourtant, la conclusion du rapport montre le risque élevé auquel est exposé cet OR et tous les travaux de correction à y apporter. À cette dernière impérativement doivent se rajouter l'inspection d'évaluation de sécurité suivie des investigations géotechniques, de la révision des activités de surveillance, de certains paramètres d'analyses, des études de stabilité, l'évaluation des travaux de réfection et l'entretien préventif. Cette dernière phase est désignée faible par plusieurs auteurs qui exposent l'absence complète des inspections requises et des activités d'entretien ou de réfection préventives qui auraient dû être réalisées. Ce sont des actions incontournables qui s'inscrivent dans les politiques recommandées et exigées de gestion environnementale. Ce constat permet de se rendre compte de la faiblesse des mesures de surveillance requises et importantes par les gestionnaires ou autres parties prenantes. Se rallier aux actions amorcées en Colombie-Britannique serait positif pour le Québec connu pour ses potentialités minières au Canada.

**ANNEXE IV**

**TABLEAUX DE L'ARTICLE 1**

Tableau A V-1: Summary of environmental factors or valued components of the environment (VCE)

VCEs		STATUS	
		PROJECT	REALIZED
<b>Geomorphology</b>	Landscape	Morphology	Morphology
	Topography	Geography	Geography
<b>Pedology</b>	Ground	Quality of the soil resources	Quality of the soil resources
		Surface deposit	Surface deposit
	Subsoil	Geology	Geology
		Geotechnical conditions	Geotechnical conditions
		Sediments	sediments
		Erosion	Erosion
Sterile and residues	Sterile and residues		
<b>Atmospheric</b>	Air	Quality	Quality
		Pollution	Pollution
		Emission and deposition of dust	Emission and deposition of dust
	Climate	Microclimate	Microclimate at workstations
		Suspended particles	Microclimate
<b>Acoustic</b>	Noise	Level	Suspended particles
		Noise pollution	Level
	Vibration	Vibration level or air overpressures	Noise pollution
<b>Vegetal</b>	Flora	Species at risk	Vibration level or air overpressures
		Density and diversity	Species at risk
		Aquatic plants	Density and diversity
		Wet areas	Aquatic plants
<b>Wildlife</b>	Animals	Habitats	Wet areas
		Density and diversity	Habitats
	Aquatic species	Species at risk	Density and diversity
		Invasive species	Species at risk
	Mammals	Species at risk	Species at risk
	Most abundant species	Most abundant or common species	

Tableau A V-1 (suite)

VCEs		STATUS	
		PROJECT	REALIZED
<b>Wildlife</b>	Birdlife	Species at risk	Species at risk
		Most abundant species	Most abundant species
<b>Water</b>	Surface water	Morphology of waters	Invasive species
		Flow / Flow	Morphology of waters
		Level	Flow / Flow
		Sedimentary regime	Level
		Groundwater	Sedimentary regime
	Groundwater / Aquifers	Debit	Groundwater
		Quality	Debit
		Level	Quality
		Hydrogeological conditions	Level and infiltration
	Runoff waters	Erosion	Flood
		Effluent quality	Hydrogeological conditions
		Flow / Flow	Erosion
		Water level	Effluent quality
		Retention basins	Flow / Flow
<b>Economic</b>	Finances	Stimulation of the local economy	Water level
<b>Social</b>	Sociocultural	Value and land use	Retention basins
		Famous heritages	Stimulation of the local economy
		Religious monuments	Value and land use
		Middle traditions	Famous heritages
		Tourism and Leisure	Religious monuments
	Health	Health infrastructures	Middle traditions
		Diseases	Tourism and Leisure
	Security	Security level	Health infrastructures
	Human capital	Population and characteristics	Epidemics
		Employability level	Diseases
		Sectors of activity known to the project community	Accidents
		Housing	Occupational injuries
		Immigration	Security level
	Governance	Social responsibility	Population and characteristics
Employability level			

Tableau A V-1 (suite)

VCEs		STATUS	
		PROJECT	REALIZED
<b>Social</b>	Governance	Social responsibility	Sectors of activity known to the project community
			Housing
			Immigration
			Social responsibility
			Conflicts of interest and management
			Ethics and corruption

Tableau A V-2: Fluctuations in the activities listed at the EIA elaboration and post-EIA

EIA matrix	Matrix post EIA
Slope construction Installation and construction of infrastructures Pit design (geological, economic, financial and operational considerations) Excavation of the catch basin and settling basin Installation of on-site lighting Warehouse for blasting / slaughtering products Lighting of transport routes Operations involving the use of mobile equipment Drilling and blasting blasting rock Storing blasting products Crushing and grinding Washing Sieve and particle size distribution if applicable Collection of ore	<p style="text-align: center;"><b>No activities to mention</b></p> Storing blasting products Drilling and blasting blasting rock Excavation of fragmented blocks Collection and loading of ore blocks in trucks by skips or shovels Ore transport before primary treatment Temporary storage of ore, where appropriate, according to form and area Loading, crushing and grinding Wash if necessary

Tableau A V-2 (suite)

EIA matrix	Matrix post EIA
	Temporary storage 2 of the ore if necessary according to the form and the area Grinding if necessary Sieve and particle size distribution if applicable Sorted ore pickup if required
Transport of chemicals Concentration and processing of ore	Chemical transport and unloading Concentration and processing of ore
	Storage of residues
Evacuation of water and effluents from the open pit	Evacuation of water and effluents from the open pit
Ore transport	Ore transport
Management and handling of ore in terminal phase	Handling of terminal ore for shipping or sale purposes
	Transport of domestic and mining waste Waste rock management
Management of waste rock and tailings	Management of tailings
Surface water management	Surface water management
	Maintenance of rolling stock
Management of petroleum products	Reception of petroleum products
Fuel warehouse	Fuel warehouse
Fire and management	Fire: Crisis situation
	Fire: Prevention and Emergency Plan
Slope failure	Management in case of fire Slope failure
Spills of fuel or other spills	Spills of fuel or other spills
	Temporary plant shutdowns for maintenance
Site maintenance, repairs and installation of lighting	Site maintenance, repairs and installation of lighting
Failure of the catch basin or settling basin	Failure of the catch basin or settling basin
Environmental monitoring at predetermined intervals	Environmental monitoring at predetermined intervals
Demolition of infrastructure	Demolition of infrastructure according to the restoration program selected
Integrity of works (supervision and maintenance works)	Integrity of works (supervision and maintenance works)
Environmental monitoring	Environmental monitoring
Rehabilitation of the land	Rehabilitation of the land according to the restoration program selected



Tableau A V-2 (suite)

<b>EIA matrix</b>	<b>Matrix post EIA</b>
Monitoring the quality of the effluent Monitoring the quality of groundwater General management of residues Agronomic monitoring	Monitoring the quality of the effluent Monitoring the quality of groundwater General management of residues (domestic, mining, waste and other waste) Agronomic monitoring



## ANNEXE V

### APPENDICES A, B1, B2, C1, C2 ET D DE L'ARTICLE 1

#### Appendice A

Tableau Appendice A-1 : Importance of the impact according to the value of the component as well as the intensity, extent and duration of the impact

Value of the environmental component	Intensity of disturbance	Extent of impact	Duration of impact	Significance of impact		
				Strong	Average	Low
Higher	Strong	Regional	Long	x		
			Average	x		
			Short	x		
		Topical	Long	x		
			Average	x		
			Short		x	
		Punctual	Long	x		
			Average		x	
			Short		x	
	Average	Regional	Long	x		
			Average	x		
			Short		x	
		Topical	Long	x		
			Average	x		
			Short		x	
		Punctual	Long		x	
			Average		x	
			Short			x
	Low	Regional	Long	x		
			Average		x	
			Short		x	
		Topical	Long		x	
			Average		x	
			Short			x
Punctual		Long		x		
		Average			x	

Tableau Appendice A (suite)

Value of the environmental component	Intensity of disturbance	Extent of impact	Duration of impact	Significance of impact		
				Strong	Average	Low
Higher	Low	Punctual	Short			x
Medium	Strong	Regional	Long	x		
			Average	x		
			Short		x	
		Topical	Long	x		
			Average	x		
			Short		x	
		Punctual	Long		x	
			Average		x	
			Short			x
	Average	Regional	Long	x		
			Average	x		
			Short		x	
		Topical	Long	x		
			Average		x	
			Short			x
		Punctual	Long		x	
			Average			x
			Short			x
	Low	Regional	Long		x	
			Average		x	
			Short			x
		Topical	Long		x	
			Average			x
			Short			x
		Punctual	Long			x
			Average			x
			Short			x
Average				x		
Short				x		
Topical		Long		x		
		Average		x		
		Short			x	

Tableau Appendice A (suite)

Value of the environmental component	Intensity of disturbance	Extent of impact	Duration of impact	Significance of impact		
				Strong	Average	Low
Low	Strong	Regional	Long	x		
			Average		x	
			Short		x	
		Topical	Long		x	
			Average		x	
			Short			x
		Punctual	Long		x	
			Average			x
			Short			x
	Average	Regional	Long		x	
			Average		x	
			Short			x
		Topical	Long		x	
			Average			x
			Short			x
		Punctual	Long			x
			Average			x
			Short			x
	Low	Regional	Long		x	
			Average			x
			Short			x
		Topical	Long			x
			Average			x
			Short			x
Punctual		Long			x	
		Average			x	
		Short			x	











### Appendice B1 de l'article 1

Tableau Appendice B-1 : Overview of the environmental components family score step

Environmental components	PHYSIQUE												BIOLOGIQUE						HUMAN				
	Geomorp biological			Soil			Air			Acoustic			Vegetal		Wildlife		Water		Economic		Social		
	PP	OP		PP	OP		PP	OP		PP	OP		PP	OP	PP	OP	PP	OP	PP	OP	PP	OP	
Phase:	15	30		250	400		354	690		248	473		335	137	639	478	90	398	197	90	414		
Final negative results	10	154	345	134	551	146	384	653	2	7	39	32	355	178	721	665	640	118	145	111	554	1728	
Final positive results	12	19		44	44		17	50	15	3	44	53	101	135	135	135	91	354	181	152	109	1402	

PP : Project phase - OP : Operation phase

## APPENDICE D

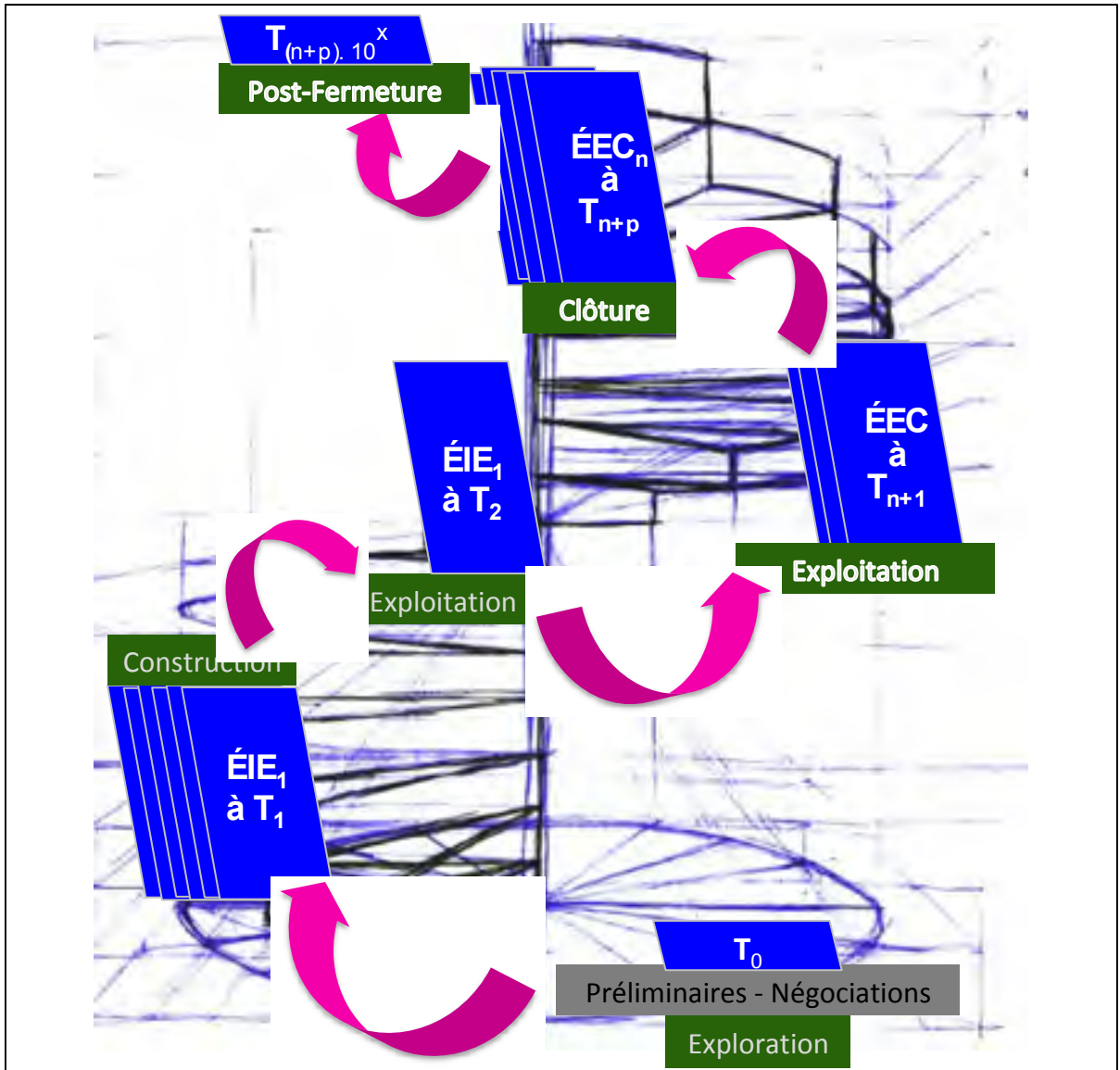


Figure appendice D.1 : Procédure hélicoïdale de la GEM proposée avec une succession d'évaluations et d'analyses



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Dayem, S. (2011). Water quality management in Egypt. *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 181-202. doi: 10.1080/07900627.2010.531522
- Agbo, S. J. A., & Honkpehedji, R. N. (2009). *Analyse des déterminants de la production des cultures vivrières au Bénin: Cas du maïs et de l'igname* (Mémoire cycle 2, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin).
- Agence canadienne d'évaluation environnementale. (2013). *Projet minier Kitsault - Rapport d'étude approfondie*. Ottawa, ON: Avanti Kitsault Mine Itée. Repéré à <https://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/p57958/93659E.pdf>
- Agence canadienne d'évaluation environnementale, & Atlantique Gold Corporation. (2017). *Étude d'impact environnemental du projet de la mine Beaver Dam* (ÉIE n° 088664). Marinette (Nouvelle-Écosse): Atlantique Gold Corporation. Repéré à <http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/p80111/119357F.pdf>
- Akkoyun, O., & Careddu, N. (2013). Mine simulation for educational purposes: A case study. *Computer Applications in Engineering Education*, 23(2), 286-293. doi: DOI: 10.1002/cae.21598
- Alberta government. (2012). *Vista Coal Mine Project - Environmental impact assessment*. Yellowhead County, AL: Coalspur. Repéré à <https://open.alberta.ca/publications/5582113>
- Almeida, J., Domingues, P., & Sampaio, P. (2014). Different perspectives on management systems integration. *Total Quality Management & Business Excellence Journal*, 25(3-4 February), 338-351. doi: 10.1080/14783363.2013.867098
- Amec Foster Wheeler. (2012). *Projet minier Kitsault - Kitsault mine project environmental assessment*. Prince Rupert, CB: Avanti Kitsault Mine Ltd. Repéré à <https://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/p57958/93659E.pdf>
- André, P., Delisle, C. E., & Revéret, J. P. (2004). *Environmental Assessment for Sustainable Development: Processes, Actors and Practice* (2e éd.). Québec, CA: Presses inter Polytechnique.
- André, P., Delisle, C. E., & Revéret, J. P. (2010). *L'évaluation des impacts sur l'environnement: processus, acteurs et pratique pour un développement durable* (3e éd.). Québec, CA: Presses internationales Polytechnique.
- APEGBC. (2013). *Legislated dam safety reviews in British Columbia - APEGBC professional practice guidelines* (Guidelines). Burnaby, British Columbia:

Association of professional engineers and geoscientists of British Columbia (APEGBC).

- Araz, O. M. (2013). Integrating complex system dynamics of pandemic influenza with a multi-criteria decision making model for evaluating public health strategies. *J Syst Sci Syst Eng*, 22(3), 319-339. doi: 10.1007/s11518-013-5220-y
- Armstrong, J., & Menon, R. (2000). Les mines et les carrières Dans A. V. Mager Stellman Jeanne (Éd.), *Encyclopédie de sécurité et de santé au travail* (Vol. 3e édition, Vol 4, pp. 74.71- 74.61). Genève: International Labour Organization.
- Ashofteh, P.-S., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2017). Multi-Criteria environmental impact assessment of alternative irrigation networks with an adopted matrix-based method. *Water Resour Manage*, 31, 903–928. doi: 10.1007/s11269-016-1554-9
- Askari-Nasab, H., Frimpong, S., & Szymanski, J. (2007). Modelling open pit dynamics using discrete simulation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 21(1), 35-49. doi: 10.1080/17480930600720206
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., . . . Li, L. (2002, 5-8 .06.2002). *La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement* présentée à Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil / Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, QC.
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Mbonimpam, M., & P., C. R. (2013). Partie I – Mise en contexte et caractéristiques générales. *Déchets Sciences et Techniques*, 64, 28-36.
- Autorité des marchés financiers. (2016). *Règlement 43-101 sur l'information concernant les projets miniers - chapitre V-1.1, r. 15.* (Ch V-1.1, r. 15). Québec, QC: Autorité des marchés financiers Repéré à <https://lautorite.qc.ca/fileadmin/lautorite/reglementation/valeurs-mobilieres/43-101/2016-05-09/2016mai09-43-101-vofficielle-fr.pdf>.
- Aven, T., & Renn, O. (2009). On risk defined as an event where the outcome is uncertain. *Journal of Risk Research*, 12(1), 1-11. doi: DOI: 10.1080/13669870802488883
- Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred. *Waste geotechnic - Geotechnical News*, 50-53.
- Baard, P. (2014). Risk-reducing goals: ideals and abilities when managing complex environmental risks. *Journal of Risk Research*, 19(2), 164-180. doi: 10.1080/13669877.2014.961513

- BAPE. (2013). *Projet d'ouverture et d'exploitation d'une mine d'apatite à Sept-Îles* (Rapport 301). Québec, QC: Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE). Repéré à <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape301.pdf>
- Barbut, M. (2004). *Managing the risks of chemicals* (n° 2-3). Paris, France: UNEP. Repéré à <http://www.uneptie.org>
- Barrette, N., Vandersmissen, M.-H., & Roy, F. (2018). *Atlas web de la vulnérabilité de la population québécoise aux aléas climatiques* (Document Synthèse). Laval, QC: Département de géographie, Université Laval.
- Beauregard, A.-J., Gaudreault, D., & D'amours, C. (2013). *Technical report on the lamaque property - integra gold corp.* (n° NTS. 32 C/04). Val-d'Or, QC: Geologica group conseil. Repéré à [http://www.integragold.com/i/pdf/reports/2013-11-01\\_NI43-101\\_Lamaque.pdf](http://www.integragold.com/i/pdf/reports/2013-11-01_NI43-101_Lamaque.pdf)
- Ben-Awuah, E. (2013). *Oil sands mine planning and waste management using goal programming* (Thesis, University of Alberta, Edmonton, AL).
- Bérard, C. (2009). *Le processus de décision dans les systèmes complexes: une analyse d'une intervention systémique* (Doctorat en administration, UQAM, Université Paris-Dauphine, Montréal, Canada).
- Bhatasara, S. (2013). Black granite mining and the implications for the development of sustainability in Zimbabwe: the case of Mutoko communities. *Environment Development Sustainable journal*, 15, 1527-1541. doi: 10.1007/s10668-013-9456-y
- Biron, C., Ivers, H., Brun, J.-P., & Cooper, C. L. (2006). Risk assessment of occupational stress: Extensions of the Clarke and Cooper approach. *Health, Risk & Society*, 8(4), 417-429. doi: 10.1080/13698570601008222
- Birou, A. (1966). *Vocabulaire pratiques des sciences sociales* (Vol. 2). Paris, France: Édition les ouvriers.
- Boiral, O. (2005). Compte rendu d'un ouvrage recensé. *Relations industrielles / Industrial Relations*, 60(2), 392-394. doi: 10.7202/011735ar. Repéré à <http://id.erudit.org/iderudit/011735ar>
- Bonzongo, J. C., Lyons, W. B., Hines, M. E., Warwick, J. J., Faganeli, J., Horvat, M., . . . Miller, J. R. (2002). Mercury in surface waters of three mine-dominated aquatic systems: Idrija River, Slovenia; Carson River, Nevada, USA; and Madeira River, Brazil. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2(2), 111-120. doi: 10.1144/1467-787302-014

- Botin, J. A. (2009). *Sustainable Management of Mining Operations* (Vol. 1ère éd. Vol 1). Littleton: Society for Mining Metallurgy. Repéré à <http://books.google.ca/books?id=EOq691P4oq8C>
- Bouloiz, H., Garbolino, E., & Tkiouat, M. (2013). Modeling of an organizational environment by system dynamics and fuzzy logic. *Open Journal of Safety Science and Technology*, (3), 96-104. doi: 10.4236/ojsst.2013.34012
- Boussicault, B. (2007). *Étude géophysique d'une digue de rétention d'eau, parc à résidus miniers SOLBEC, Stratford, Québec* (Mémoire, Université du Québec, Québec, QC).
- Bouvier, A.-L. (2006). *L'évolution de l'évaluation des impacts depuis le début des années 1970 : Le cas des grands barrages hydroélectriques au Québec* (Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal).
- Bowles, J. B. (2003). An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. Dans *Annual Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings* (49 éd., pp. 380- 386). USA: IEEE. doi: 10.1109/RAMS.2003.1181754
- Braband, J., & Griebel, S. (2004). Engineering a simple, yet rigorous, Risk Analysis Method. Dans S. Seker, S. McLoone & U. D. Krüger (Éds.), *Proceedings, the Irish Signals and Systems Conference 2004: ISSC 2004* (Vol. 506, pp. 149–157). Michigan: Institution of Electrical Engineers. Repéré à <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/Bieleschweig/fifth/download/B5-Griebel.pdf>
- British standards. (2002). *PD ISO/IEC Guide 73:2002*. Guide Guide 73:2002. Londre, Royaume uni: British Standards Institution (BSI) group.
- Butaré, I., & Keita, S. (2010). *Aspects environnementaux liés au développement du secteur minier en Afrique de l'Ouest* (Rapport technique). Dakar, Sénégal: Centre de recherches pour le développement international (CRDI).
- Campbell, B., Hatcher, P., Lafortune, A., Sarrasin, B., Akabzaa, T., & Butler, P. (2004). *Enjeux des nouvelles réglementations minières en Afrique*. Uppsala, Suède: Groupe de recherche sur les activités minières en Afrique (GRAMA) Faculté of de Science politique et de droit. Repéré à <http://www.ieim.uqam.ca/IMG/pdf/Manuscrit-Fra-2004.pdf>
- Canada. (2000). *Suppliers of Mining Goods and Services in Canada : Link between canadian mining company and selected sectors of canadian economy* (Publication). Ressources Naturelles Canada,. Repéré à <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/mms-smm/busi-indu/pdf/minegs-eng.pdf>
- Canter, L. W. (1982). Environmental impact assessment. *Impact Assessment*, 1(2), 6-40. doi: 10.1080/07349165.1982.9725447



- Cantré, S., & Saathoff, F. (2013). Investigation of dredged materials in combination with geosynthetics used in dike construction. *Procedia Engineering*, 57, 213-221. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.030
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Boston, USA: Houghton Mifflin Harcourt.
- Castro, L. M., Gulías, V. M., Abalde, C., & Jorge, J. S. (2008). Managing the Risks of Risk Management. *Journal of Decision Systems*, 17(4), 501-521. doi: DOI:10.3166/JDS.17.501-521
- Caumartin, R. (2007). *Rétro-analyse de l'instabilité d'une pente dans une mine à ciel ouvert assistée de la modélisation numérique utilisant la méthode des éléments distincts* (Memoire, Université Laval, Québec, QC). Repéré à <http://www.theses.ulaval.ca/2007/24346/24346.pdf>
- Centeno, M. A. (1996). An introduction to simulation modelling. Dans J. M. Charnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner & J. J. Swain (Éds.), *WSC '96 Proceedings of the 28th conference on Winter simulation* (pp. 15-22 ). SCS int. doi: 10.1145/256562.256564
- Checkland, P. (1976). Science and systems paradigm. *International journal of general systems*, 3(2), 1-8. doi: 10.1080/03081077608934748
- Chinbat, U. (2011). Risk Analysis in the Mining Industry. Dans M. Savino (Éd.), *Risk management in Environment, Production and Economy* (pp. 103-122). Mongolie: InTech. doi: 10.5772/16255
- Chun-Chin, W., Guor-Cheng, F., & Chao-Hung, K. (2009). Bioaerosols as contributors to poor air quality in Taichung city, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1-4), 1-9. doi: 10.1007/s10661-009-0980-z
- Clarke, S. G., & Cooper, C. L. (2000). The risk management of occupational stress. *Health, Risk & Society*, 2(2), 173 - 187. doi: 10.1080/713670158
- Cloete, S., Zupanc, C., Burgess-Limerick, R., & Wallis, G. (2012, 22-26 October). *Steering performance and dynamic complexity in a simulated underground mining vehicle* présentée à Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting 2012. doi: 10.1177/1071181312561386
- Commission Européenne. (2009). *Document de référence sur les meilleures techniques disponibles - Gestion des résidus et stériles des activités minières* (Rapport technique n° MTWR). Commission Européenne.
- Conseil, M. (2012). *Projet d'aménagement de la place Morgan : Diagnostic environnemental*. Provence, France: Médiaterre Conseil.

- Cooper, J., Vigon, B., Curran, M., & Franklin, B. (2005). Life cycle assessment in management, product and process design and policy decision making: A conference report. *Integrated Environmental Assessment Management*, 1(1), 60–65.
- Côté, C., Pelletier, J.-M., & Lacharme, I. (2006). *Recherche sur les aspects ergonomiques du poste de forage au diamant*. Abitibi-Témiscamingue, Canada: Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Couture, M., & Fournier, R.-P. (1997). *La recherche en sciences et génie: guide pratique et méthodologique*. Saint-Nicolas, QC: Les Presses de l'université Laval.
- Csavina, J., Landázuri, A., Wonaschütz, A., Rine, K., Rheinheimer, P., Barbaris, B., . . . Betterton, E. (2011). Metal and metalloid contaminants in atmospheric aerosols from mining operations. *Water, Air and Soil Pollution*, 221(1-4), 145-157. doi: 10.1007/s11270-011-0777-x
- Dato, P., & Flifli, V. (2008). *Politique de gestion durable des ressources naturelles non renouvelables au Bénin : Cas de l'exploitation du gravier dans la commune de Dogbo* (Mémoire de recherche, Université d'Abomey-Calavi (UAC), Abomey-Calavi).
- Davies, T. C. (2010). Geoscientific and environmental health issues in Africa. *Journal of International Geology Review*, 52(7-8), 873-897. doi: 10.1080/00206811003679869
- Loi n°2006-17 : Code minier et fiscalités minières en république du Bénin, 2006-17 C.F.R. (2006).
- Dhillon, B. S. (2009). Mining equipment safety: a review, analysis methods and improvement strategies. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(3, January), 168-179. doi: 10.1080/17480930902916239
- Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S. (2008). Stochastic integer programming for optimising long term production schedules of open pit mines: methods, application and value of stochastic solutions. *Mining Technology*, 117(4), 155-160. doi: 10.1179/174328609X417279
- Dionne, C., Bourbonnais, R., Frémont, P., Rossignol, M., & Stock, S. (2004). *Le pronostic occupationnel des travailleurs aux prises avec des affections vertébrales* (n° R-356). Montréal, Canada: IRSST.
- Doherty, N. A. (2000). *Integrated risk management: techniques and strategies for managing corporate risk*. New York, USA: McGraw-Hill professional. Repéré à [http://books.google.ca/books?id=znD2e\\_XZNv0C](http://books.google.ca/books?id=znD2e_XZNv0C)

- Donkor, A., Bonzongo, J.-C., Nartey, V., & Adotey, D. (2005). Heavy Metals in Sediments of the Gold Mining Impacted Pra River Basin, Ghana, West Africa. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 14(6), 479-503. doi: 10.1080/15320380500263675
- Donoghue, A. M. (2004). Occupational health hazards in mining: an overview. *Occupational Medicine*, 54(5 April), 283-289. doi: 10.1093/occmed/kqh072
- Duinker. (1989). Ecological effects monitoring in environmental impact assessment: What can it accomplish? *Environmental Management*, 13(6), 797-805. doi: 10.1007/BF01868319
- Duncan, E. E., & Rahman, A. A. (2013). 3D GIS for mine development – integrated concepts. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(1), 3-18. doi: 10.1080/17480930.2013.828443
- EC. (2004). *Land-Use Practices and Changes - Mining and Petroleum Production, Threats to Water Availability in Canada* (Government report n° Cat. no. En40-237/3-2004E). Ottawa, ON, Canada: Environment Canada (EC). Repéré à <http://www.ec.gc.ca/inre-nwri/default.asp?lang=En&n=0CD66675-1&offset=14&toc=show-table1>
- EC. (2009). *Environmental code of practice for metal mines* (Rapport et guide technique n° 1/MM/17). Ottawa, ON, Canada: Environment Canada (EC). Repéré à <https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/mm/mm-eng.pdf>
- Edwards, D. P., Sloan, S., Weng, L., Dirks, P., Sayer, J., & Laurance, W. F. (2013). Mining and the African environment. *Conservation Letters, Policy perspective*, 7(3), 302-311 doi: 10.1111/conl.12076
- Eggert, R. (2006). *Mining, sustainability and sustainable development* présentée à Australian Mineral Economics, Adelaide, Australia.
- Eisler, R. (2004). Mercury hazards from gold mining to humans, plants and animals. *Revue of Environmental Contaminants and Toxicology*, 181, 139 - 198. doi: 10.1007/0-387-21733-9\_4
- ELAW. (2010). *Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers*. Eugene, USA: Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW).
- Elichegaray, C. (2008). *La pollution de l'air : sources, effets, prévention* (Vol. Vol 1). Paris, France: Dunod université.
- Environmental compliance. (2003). Prevention better than cure [mining industry]. *Materials World*, 11(12), 29-30.

- Erol, Y. (2010). *Investigating the Hydrogeotechnical and Microstructural Properties of Cemented Paste Backfill Using the CUAPS Apparatus* (Doctorate, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Abitibi Témiscamingue, QC). Repéré à <http://depositum.uqat.ca/id/eprint/34>
- Evangelinos, K. I., Allan, S., Jones, K., & Nikolaou, I. E. (2014). Environmental management practices and engineering science: A review and typology for future research. *Integrated environmental assessment and management*, 10(2), 153-162. doi: 10.1002/ieam.1504
- Fadiran, A. O., Dlamini, C. L., & Thwala, J. M. (2014). Environmental assessment of acid mine drainage pollution on surface water bodies around ngwenya mine, Swaziland. *Journal of Environmental Protection*, 5(2), 164-173. doi: 10.4236/jep.2014.52020
- Falkenmark, M. (2001). The greatest water problem: The inability to link environmental security, water security and food security. *Water Resources Development Journal*, 17(4), 539-554. doi: 10.1080/07900620120094073
- Falkenmark, M. (2011). Water - A reflection of land use: Understanding of water pathways and quality genesis. *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 13-32. doi: 10.1080/07900627.2010.536943
- Farmer, D. L. (2013). *Land and Water Quality Protection in Hampton Roads - Phase II* (n° PEP13-13). Hampton Roads, Virginia: Hampton Roads Planning District Commission. Repéré à <http://www.hrpdcva.gov/uploads/docs/11212013-PDC-E3A.pdf>
- Fleurisson, J.-A., & Grenon, M. (2014). Conception géomécanique de talus de mines à ciel ouvert. Conception géomécanique de talus de mines à ciel ouvert. *Hal*, 65-84. Repéré à <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00979370>
- Freeman, C., & Louçã, F. (2001). *As time goes by. From the industrial revolutions to the information revolution*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Fuchs, H. U. (2006, 8-10. 12. 2006). *System dynamics modelling in science and engineering* Conference paper présentée à System Dynamics Conference (SDC), University of Puerto Rico (Resource Center for Science and Engineering), Mayaguez, Puerto Rico. Repéré à [http://www.hansfuchs.org/MATERIALS/PR\\_SDMSE.pdf](http://www.hansfuchs.org/MATERIALS/PR_SDMSE.pdf)
- Fuentes, J. E., George, T., & Whittaker, J. (2008, 6-8 .08.2008). *Measuring and mitigating risk in mining operations* Article présentée à International Conference on Mining Innovation - MININ 2008, Santiago, Chili.
- Gendron, C. (2004). *La gestion environnementale et la norme ISO 14001*. Québec, QC: Presses de l'Université de Montréal.

- Gendron, C. (2006). *Le développement durable comme compromis. La modernisation écologique de l'économie à l'ère de la mondialisation*. Québec, QC: Presses de l'Université du Québec.
- Genivar. (2006). *Projet de mine de fer du lac Bloom, Consolidated Thompson Iron Mines Limited (CLM): étude d'impact - Rapport principal* (n° Q104949). Sept-îles, QC: Genivar. Repéré à [https://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/lac\\_bloom/documents/PR3-1.pdf](https://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/lac_bloom/documents/PR3-1.pdf)
- Genivar. (2008). *Projet minier Canadian Malartic : Étude d'impact sur l'environnement (EIE)* (Rapport principal n° AA106790). Malartic, Québec: Genivar. Repéré à [http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/Mines\\_Malartic/documents/PR3.1\\_partie1de3.pdf](http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/Mines_Malartic/documents/PR3.1_partie1de3.pdf)
- Genivar. (2013). *Projet de mine d'apatite du lac à Paul. Étude d'impact sur l'environnement. Rapport principal* (n° N/Réf : 121-24005-00). Baie Comeau, QC: Genivar pour Ariane Phosphate.
- George, J., Thakur, S. K., Tripathi, R. C., Ram, L. C., Gupta, A., & Prasad, S. (2010). Impact of coal industries on the quality of Damodar river water. *Toxicological & Environmental Chemistry Journal*, 92(9), 1649-1664. doi: 10.1080/02772241003783737
- Gervais, D., Roy, C., Thibault, A., Pednault, C., & Doucet, D. (2014). *Technical report on the mineral resource and mineral reserve estimates for the Canadian malartic property (compliant with National Instrument 43-101 and Form 43-101F1)* (Technical report). Malartic, Québec Canada: Iamgold, Yamana Gold. Repéré à [http://ir.agnicoeagle.com/files/doc\\_Technical\\_Reports/CanadianMalartic/Canadian-Malartic-report-June-16-2014.pdf](http://ir.agnicoeagle.com/files/doc_Technical_Reports/CanadianMalartic/Canadian-Malartic-report-June-16-2014.pdf)
- Ghoddusi, H. (2010). Dynamic investment in extraction capacity of exhaustible resources. *Scottish Journal of Political Economy*, 57(3), 359-373. doi: 10.1111/j.1467-9485.2009.00522.x
- GIEC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (Working group report). Geneva, Switzerland: GIEC/IPCC.
- Gillet, M., & Babillot, P. (2006). *Adaptation aux changements climatiques : les propositions de l'ONERC*. Conseil de l'orientation de l'ONERC.
- Giraud, J., Pamart, P., & Riverain, J. (1971). *Les mots «dans le vent»* (Vol. Vol 5). Paris, France: Larousse.

- Godrej, S. J., & Forbes, N. (2012). *Report of the Working Group on “Effectively Integrating Industrial Growth and Environment Sustainability”. Twelfth Five Year Plan (2012-2017)*. India: Planning commission. Repéré à [http://planningcommission.gov.in/aboutus/committee/wrkgrp12/wg\\_es0203.pdf](http://planningcommission.gov.in/aboutus/committee/wrkgrp12/wg_es0203.pdf)
- González-Carrasco, V., Velasquez-Lopez, P., Olivero-Verbel, J., & Pájaro-Castro, N. (2011). Air mercury contamination in the gold mining town of portovelo, ecuador. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 87(3), 250-253. doi: 10.1007/s00128-011-0345-5
- Gorova, A., Pavlychenko, A., Borysovs'ka, O., & Krups'ka, L. (2013). *The development of methodology for assessment of environmental risk degree in mining regions* présentée à Annual Scientific-Technical Colletion - Mining of Mineral Deposits 2013, Balkema, Netherland. doi: 10.1201/b16354-38
- Gouvernement du Canada. (2017). *Loi canadienne sur l'évaluation environnementale*. (L.C. 2012, ch. 19, art.52). Ottawa, ON: Gouvernement du Canada, Repéré à <http://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/C-15.21.pdf>.
- Gouvernement du Québec. (2011). *Loi sur les mines*. (M-13.1). Québec, QC: Publications du Québec Repéré à [http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/M\\_13\\_1/M13\\_1.html](http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/M_13_1/M13_1.html).
- Gouvernement du Québec. (2017a). *Loi sur la qualité de l'environnement*. (Chapitre Q-2). Québec, QC: Publications du Québec, Repéré à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cs/Q-2.pdf>.
- Gouvernement du Québec. (2017b). *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement - Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2, a. 31, 31.1, 31.3, 31.9 et 124.1)*. (Chapitre Q-2, r. 23). Québec, QC: Publications du Québec, Repéré à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2, r. 23>.
- Gouvernement du Québec. (2018). *Loi sur la santé et de la sécurité du travail*. Québec, Canada: Yvon Blais. Repéré à [http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S\\_2\\_1/S2\\_1.html](http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_2_1/S2_1.html)
- Goyette, G., & Lessard-Hébert, M. (1987). *La recherche-action: ses fonctions, ses fondements et son instrumentation*. Québec: Presses de l'Université du Québec. Repéré à [http://books.google.ca/books?id=L4WoB\\_kQMgC](http://books.google.ca/books?id=L4WoB_kQMgC)
- Gratzfeld, J. (2004). *Industries extractives dans les zones arides et semi-arides: planification et gestion de l'environnement*. Gland, Switzerland & Cambridge, Royaume-Uni: UICN.

- Grondin, L. (2012). *Résumé du rapport sur la responsabilité sociale d'entreprise 2012*. Toronto, ON, Canada: Mines Agnico Eagle Limitée, AEM. Repéré à [https://s21.q4cdn.com/374334112/files/doc.../sd\\_reports/2012French-Summary.pdf](https://s21.q4cdn.com/374334112/files/doc.../sd_reports/2012French-Summary.pdf)
- Groso, A., Ouedraogo, A., & Meyer, T. (2012). Risk analysis in research environment. *Journal of Risk Research*, 15(2), 187-208. doi: 10.1080/13669877.2011.634513
- Halatchev, R., & Dimitrakopoulos, R. (2003). On the dynamics of mining operations in open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 17(4), 246-263. doi: 10.1076/ijsm.17.4.246.17482
- Hall, E. P. (2013). Pollution from mine drainage. Dans J. R. Pfafflin & E. N. Ziegler (Éds.), *Encyclopedia of environmental science and engineering* (Vol. Sixth Edition, pp. 1434). Floride, USA: CRC press Inc.
- Hattingh, J., & Claassen, M. (2008). Securing Water Quality for Life *International Journal of Water Resources Development*, 24(3), 401-415. doi: 10.1080/07900620802127333
- Hayes, K. (2008, 11. 2008). *Artisanal & small-scale mining and livelihoods in Africa* Conference paper présentée à 2008 Regional workshop: small-scale mining in Africa - A case for sustainable livelihood, Amsterdam, Holland.
- Heimrich, A. (2012). *Plan de gestion des eaux retenues du barrage Hollow Glen - Municipalité de Chelsea* (n° F116047-003). Gatineau, QC: SM inc. Repéré à <http://www.chelsea.ca/sites/default/files/tome1publicfinal1.pdf>
- Hines, J., Malone, T., Goncalves, P., Herman, G., Quimby, J., Murphy-Hoye, M., . . . Ishii, H. (2011). Construction by replacement: a new approach to simulation modelling. *System Dynamics Review*, 27(1), 64-90. doi: 10.1002/sdr.437
- Holling, C. S. (1978). *Adaptive environmental assessment and management* (Vol. 3). Chinchester, USA: International institute for Applied Systems Analysis.
- Huang, Y., & Espley, S. (2005). A 3D mine simulation model for decision-making in mine design and production. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 19(4), 251-259. doi: 10.1080/13895260500238531
- Huisman, L., & Wood, W. E. (1974). *Slow sand filtration* (Report). Genève, Suisse: World Health Organization: WHO. Repéré à [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/ssf9241540370.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/ssf9241540370.pdf)
- ICMM. (2003). *Les 10 principes fondamentaux du rendement en matière de développement durable* (En ligne). United kingdom: Conseil International des Mines et Métaux

- (ICMM)/ International council on mining & metals. Repéré à <http://www.icmm.com/document/606>
- INAP. (2014). *Global Acid Rock Drainage (GARD) guide* (Vol. 3). Melbourne, Victoria, USA: The International Network for Acid Prevention (INAP). Repéré à <http://www.GARDGuide.com>
- Ingvaldsen, J. E., & Gulla, J. A. (2012). Industrial application of semantic process mining. *Enterprise Information Systems*, 6(2), 139-163. doi: 10.1080/17517575.2011.593103
- IPEC. (2013). *Approfondissement des connaissances sur le travail des enfants dans les mines et carrières du Bénin* (Publications du Bureau international du Travail (BIT) éd.). Genève, Suisse: OIT.
- Ishihara, K., Ueno, K., & Yamada, S. (2015). Breach of tailings dam in the 2011 earthquake in Japan. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 68, 3–22. doi: 10.1016/j.soildyn.2014.10.010
- ISO. (2004). *ISO 14001: 2004, Environmental management systems - Requirements with guidance for use*. ISO/TC 207/SC 1, Éd 2. Geneva, Swiss: International Organization for Standardization (ISO). Repéré à <http://www.iso.org>
- ISO. (2009). *ISO Guide 73: 2009 (en)*. Guide ISO/TC 262, Éd 1. Geneva, Swiss: International Organization for Standardization (ISO). Repéré à <http://www.iso.org>
- ISO. (2015). *ISO 14001: 2015. Environmental management systems - Requirements with guidance for use*. ISO/TC 207/SC 1, Éd 3. Geneva, Swiss: International Organization for Standardization (ISO). Repéré à <http://www.iso.org>
- ISO. (2018a). *ISO 31001: 2018. Risk management - Guidelines*. ISO/TC 262, Éd 2. Geneva, Swiss: International Organization for Standardization. Repéré à <http://www.iso.org>
- ISO. (2018b). *ISO 45001: 2018. Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use*. ISO/PC 283, Éd 1. Geneva, Swiss: International Organization for Standardization (ISO). Repéré à <http://www.iso.org>
- ISO standards - IEC. (2009). IEC/FDIS 31010 Risk management , Risk assessment techniques *Gestion des risques, Techniques d'évaluation des risques* (pp. 92). Geneva: ISO.
- Javadi, N. (2012). *Étude expérimentale de l'initiation de la rupture des digues en enrochement par surverse* (Mémoire, École polytechnique de Montréal, UdeM, Montréal, QC). Repéré à [https://publications.polymtl.ca/804/1/2012\\_NasrinJavadi.pdf](https://publications.polymtl.ca/804/1/2012_NasrinJavadi.pdf)



- Jébrak, M. (2015). *Quels métaux pour demain? Les enjeux des ressources minérales*. Paris, France: Dunod.
- Jordan, G., D'Alessandro, M., Hamor, T., Liedekerke, M. V., Panagos, P., Puura, E., . . . Vijdea, A. M. (2004). *Mining Waste and Related Environmental Issues: Problems and Solutions in Central and Eastern European Candidate Countries* (Report research). European commission, Ispra.
- Joughin, W. C. (2012). A risk evaluation model for support design in bushveld complex underground mines: Part I Description of the model. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 83-94. Repéré à [http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2225-62532012000200007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532012000200007&lng=en&nrm=iso)
- Kalabin, G. V. (2012). Principles of macro-ecological risk mapping of mining industry areas. *Journal of Mining Science*, 48(6), 1071-1078. doi: 10.1134/S1062739148060172
- Kalantari, S., Ben-Awuah, E., & Askari-Nasab, H. (2013). Towards an integrated oil sands mine plan and composite tailings plan. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 27(2), 103–126. doi: 10.1080/17480930.2012.661547
- Kambani, S. M. (2003). Small-scale mining and cleaner production issues in Zambia. *Journal of Cleaner Production*, 11, 141-146. doi: 10.1016/S0959-6526(02)00033-1
- Kamulete, M. N. P. (2014). *Cours d'exploitation des mines à ciel ouvert (MCO)* (Vol. 1). Rép. D. du Congo: Université de Lubumbashi (UNILU) / Faculté polytechnique - Département des mines Repéré à <http://fr.slideshare.net/Jeremieilunga/cours-dexploitation-des-mines-ciel-ouvert>
- Kasa, S. (2009, 19.02.2009). *Industrial revolutions and environmental problems* Article de conférence présentée à Confluence. Interdisciplinary communications 2007/2008, Oslo, Norvège. Repéré à [http://www.cas.uio.no/Publications/Seminar/Confluence\\_Kasa.pdf](http://www.cas.uio.no/Publications/Seminar/Confluence_Kasa.pdf)
- Keita, S. (2001). Etude sur les mines artisanales et les exploitations minières à petite échelle au Mali. *Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD)*, 80, 54. Repéré à <pubs.iied.org/pdfs/G00727.pdf>
- Kogel, J. E., Trivedi, N., & Herpfer, M. A. (2014). Measuring sustainable development in industrial minerals mining. *International journal of mining and mineral engineering*, 5(1), 4-18. Repéré à <https://geoinfo.nmt.edu/staff/mclemore/teaching/imclass/documents/Kogal.pdf>

- Konyukh , V., Galiyev, S., & Li, Z. (1999). Mine simulation in Asia. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13(2), 57-67. doi: 10.1080/09208119908944210
- Kříbeka, B., De Vivob, B., & Davies, T. (2014). Special Issue: Impacts of mining and mineral processing on the environment and human health in Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 144(Part C), 387-390. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.07.018
- Labonne, B. (1999). The mining industry and the community: joining forces for sustainable social development. *Natural resources Forum*, 23(4), 315-322. doi: 10.1111/j.1477-8947.1999.tb00919.x
- Lagnika, M. S. (2004). *Contribution à l'élaboration d'une base de données informatisées pour l'analyse et la gestion environnementale des exploitations minières au Bénin* (Mémoire de fin de formation de 1er cycle, École Polytechnique d'Abomey Calavi, Abomey-Calavi, Bénin).
- Lagnika, M. S. (2009). *La gestion des risques environnementaux au sein des entreprises immobilières* (Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada).
- Lagnika, M. S., Hausler, R., & Glaus, M. (2017). Modeling or dynamic simulation: a tool for environmental management in mining? *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 14(1), 19-37. doi: 10.1080/1943815X.2017.1294607
- Lagnika, S. B., Nadeau, S., & Ate-me-Nguema, B. (2012, 11.05.2012). *Gouvernance et exploitation des mines à ciel ouvert dans un pays en développement : cas du Bénin* présentée à 80e congrès de l'Acfas, Montréal, QC. doi: 10.13140/RG.2.2.34690.68802
- Langer, W. H., & Arbogast, B. F. (2002). Environmental impacts of mining natural aggregate. Dans A. Fabbri, G., G. Gaál & R. B. McCammon (Éds.), *Deposit and geoenvironmental models for resource Exploitation and environmental security* (Environmental security éd., Vol. 80, pp. 151 - 169). Netherlands: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-010-0303-2
- Lapointe, J. (1993). L'approche systémique et la technologie de l'éducation. *EducaTechnologiques*, 1(1), 4 - 13. Repéré à <http://www.sites.fse.ulaval.ca/reveduc/html/vol1/no1/apsyst.html>
- Larousse. (2008). *Le petit Larousse 2009 illustré* (Vol. Vol 1). Paris, France: Larousse.
- Leopold, L. B., Clarke, F., Hanshaw, B., & Balsley, J. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. *Geological Survey Circular*, No. 645(1), 1-13.

- Li, X.-g., Song, X.-f., & Li, X.-c. (2013). System dynamics modelling in coal mine safety  
 Dans S. J. Qi E, Dou R. (Éd.), *Proceedings of 2013 4th International Asia Conference  
 on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013)* (pp. 823-833).  
 Springer. doi: 10.1007/978-3-642-40060-5\_\_79
- Lintukangasa, M., Suihkonena, A., Salomäkia, P., & Selonen, O. (2012). Post-Mining  
 Solutions for Natural Stone Quarries *Journal of Mining Science*, 48(1), 142-154. doi:  
 10.1134/S1062739148010145
- Lu, J. L. (2012). Occupational Health and Safety in Small Scale Mining: Focus on Women  
 Workers in the Philippines. *Journal of International Women's Studies*, 13(3), 103-  
 113.
- Lyman, E. S., & Feiveson, H. A. (1998). The proliferation risks of plutonium mines. *Science  
 & Global Security*, 7(1), 119-128. doi: 10.1080/08929889808426449
- MAC. (2010). *A report on the state of the canadian mining industry : Facts + figures 2010*  
 (Annual Report). Repéré à  
[http://www.mining.ca/www/media\\_lib/MAC\\_Documents/Publications/2010/Facts\\_and  
 Figures\\_2010\\_English.pdf](http://www.mining.ca/www/media_lib/MAC_Documents/Publications/2010/Facts_and_Figures_2010_English.pdf)
- MAC. (2014). *Facts + figures 2014 of the canadian mining industry* (Annual report).  
 Ottawa, ON: Mining Association of Canada (MAC). Repéré à  
[http://mining.ca/sites/default/files/documents/Facts\\_and\\_Figures\\_2014.pdf](http://mining.ca/sites/default/files/documents/Facts_and_Figures_2014.pdf)
- MacKinnon, A. J. (2017). *Implementing science in environmental assessment - A review of  
 theory* (Partial fulfilment report for the degree of Master of environmental studies,  
 Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia).
- MacKinnon, A. J., Duinker, P. N., & Walker, T. R. (2018). *The Application of science in  
 environmental impact assessment* (Vol. 1). London, UK: Routledge.
- Majumder, M. (2015). *Impact of urbanization on water shortage in face of climatic  
 aberrations*. Agartala, India: Springer. doi: 10.1007/978-981-4560-73-3
- Marche, C. (2008). *Barrages, crues de rupture et protection civile* (Vol. 2e édition). Québec:  
 Presses internationales Polytechnique.
- Mballo, B. (2012). *Impacts possibles des activites minières sur les ressources en eau en  
 Afrique de l'ouest : cas des mines aurifères du Burkina Faso* (Mémoire, institut  
 international d'ingénierie, de l'eau et de l'environnement (2IE), Ouagadougou,  
 Burkina Faso).

- McCullough, C. D. (2008). Approaches to remediation of acid mine drainage water in pit lakes. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22(2), 105-119. doi: 10.1080/17480930701350127
- Meech, J., Veiga, M., & Tromans, D. (1998). Reactivity of mercury from gold mining activities in darkwater ecosystems. *Ambio, Journal of the Human Environment*, 27(2), 92-98.
- Mermet, L., Billé, R., Leroy, M., Narcy, J.-B., & Poux, X. (2005). L'analyse stratégique de la gestion environnementale : un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement. *Natures Sciences Sociétés*, 13(2), 127-137. doi: 10.1051/nss:2005018
- Mertzanis, A., Papadopoulos, A., & Pantera, A. P., 14th International Congress of speleology. Athens – Kalamos, . (2005). The impacts to the environment and the creation of « Pseudokarst » landforms, from the bauxite mining activity in the mountain of Ghiona (Central greece). Dans M. Dermitzakis (Éd.), *14th International Congress of speleology* (pp. 5). Hellenic speleological society.
- Mirchi, A., Madani, K., Watkins Jr., D., & Ahmad, S. (2012). Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resource Management*, 26, 2421-2442 doi: 10.1007/s11269-012-0024-2
- Montiel, L., & Dimitrakopoulos, R. (2015). Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives : An uncertainty-based approach. *European Journal of Operational Research*, 247, 166-178. doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.002
- Morin, A. (2010). *Cheminer ensemble dans la réalite complexe: La recherche-action intégrale et systémique*. Paris: L'Harmattan. Repéré à <http://books.google.com.ec/books?id=IEWK7T0KWXYC>
- Morteza, O., & Mahdi, R. (2014). Mine design selection considering sustainable development. Dans C. Drebenstedt & R. S. (eds.) (Éds.), *Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 151-163). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-02678-7\_16
- Mousavi, A., Chavez, R. D., Ali, A.-M. S., & Cabaniss, S. E. (2011). Mercury in natural waters: a mini-review. *Environmental Forensics*, 12(1), 14-18. doi: 10.1080/15275922.2010.547549
- MTPSGC. (2000). *Approche fédérale en matière de lieux contaminés*. Ottawa, Canada: Ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux Canada.

- Müezzinoğlu, A. (2003). A review of environmental considerations on gold mining and production. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 33(1), 45-71. doi: 10.1080/10643380390814451
- Murray, C. (2014). *Impacts environnementaux et mesures d'atténuation reliées à l'exploration et l'exploitation des mines d'uranium* (Rapport de fin de cycle de maîtrise). Sherbrooke, QC: Centre universitaire de formation en environnement et développement durable.
- Nadeau, S., Badri, A., Wells, R., Neumann, P., G., K., & Morrison, D. (2013). Sustainable Canadian mining: Occupational health and safety challenges. Dans Sage (Éd.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 57th Annual Meeting* (pp. 1071-1074). Sage publications. doi: 10.1177/1541931213571238
- Naidu, R., Megharaj, M., Dillon, P., Kookana, R., Correll, R., & Wenzel, W. (2003). Pollution, Non-point source. Dans B. A. Stewart & T. Howell (Éds.), *Encyclopedia of Water Science (Print)* (pp. 704-708). New York, USA: CRC Press.
- Nakayama, J., Sakamoto, J., Kasai, N., Shibutani, T., & Miyake, A. (2016). Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(18), 7518-7525. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.143
- Nemaska lithium, & Agence canadienne d'évaluation environnementale. (2013). *Projet Whabouchi: Développement et exploitation d'un gisement de spodumène sur le territoire de la baie-james - Étude des impacts sur l'environnement et le milieu social*. Nemaska, QC: Nemaska lithium,. Repéré à <https://ceaa-acee.gc.ca/050/documents/p80021/83898F.pdf>
- New Brunswick. (2015). *Sisson mine project environmental impact assessment report summary, Vol 2*. Napadogan, NB: Stantec Consulting Ltd. Repéré à <http://www.tobiquefirstnation.ca/communityEngagement/sissonProject/SummaryEIA.pdf>
- Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces journal*, 40(3), 222-245. doi: 10.1287/inte.1090.0492
- Nicot, F. (2018). Les risques naturels. *Encyclopédie de l'environnement*, 1-6.
- NIOSH. (2011). *Underground Surface Mining Facts - 2008* (Statistique report n° No. 2011-162). Pittsburgh, PA: Mine Safety and Health Administration (MSHA). Repéré à <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2011-162.pdf>

- NIOSH. (2016). *Mining Facts - 2014* (Statistique report n° Publication No. 2011-162). Pittsburgh, PA: Mine Safety and Health Administration (MSHA). Repéré à <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2011-162.pdf>
- NMA. (2010). *The Economic Contributions of U.S. Mining in 2008* (Report). Washington, D.C.: National Mining Association. Repéré à [http://www.nwma.org/pdf/economic\\_contributions.pdf](http://www.nwma.org/pdf/economic_contributions.pdf)
- Observatoire de l'Abitibi-Témiscamingue. (2009). Entreprises minières en exploitation et nombre d'emplois, abitibi-témiscamingue et nord-du-québec [Carte]. Repéré à <http://www.observat.qc.ca/statistiques/57/mines/345/entreprises-minieres-en-exploitation-et-nombre-d-emplois-abitibi-temiscamingue-et-nord-du-quebec-2009>
- Observatoire de l'Abitibi-Témiscamingue. (2010). Répartition de l'investissement minier pour les trois principales régions minières du québec [Carte]. Repéré à <http://www.observat.qc.ca/statistiques/57/mines/346/repartition-de-l-investissement-minier-pour-les-trois-principales-regions-minieres-du-quebec-k-2010>
- Odell, C. J. (2004). *Integration of sustainability into the mine design process - UBC 2004-0584* (Thesis, Unisversity of British Columbia, Vancouver, BC, Canada).
- Ogola, A. P. F. (2007, 2-17.11. 2007). *Environmental impact assessment general procedures* Scientific article présentée à Short Course II on Surface Exploration for Geothermal Resources, Lake Naivasha, Kenya.
- OHSAS. (2007). OHSAS 18001:2007, Requirements (pp. 34). London, United Kingdom: BSI.
- OIT. (2010). *Risques émergents et nouvelles formes de prévention dans un monde du travail en mutation*. Genève, Suisse: Bureau internationale du travail (BIT).
- Olivier, P., & Herbert, V. (2010). *Risque environnemental et action collective*. Paris, France: Éditions TEC & DOC, Lavoisier.
- Osanloo, M., Gholamnejada, J., & Karimi, B. (2008). Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22(1), 3-35. doi: 10.1080/17480930601118947
- Oyarzun, R., Cubas, P., Higuera, P., Lillo, J., & Llanos, W. (2009). Environmental assessment of the arsenic-rich, Rodalquilar gold (copper-lead-zinc) mining district, SE Spain: data from soils and vegetation. *Environmental Geology*, 58(4), 761-777. doi: 10.1007/s00254-008-1550-3
- Panov, Z., Ristova, E., & Stefanovska, L. (2011). Environmental strategies in the mining: the importance of development and implementation national environmental strategy for

- waste treatment. Dans *11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2011* (Vol. 3, pp. 319-326). Albena, Bulgarie: Surveying Geology & mining Ecology Management 2011 Conference Proceedings. doi: 10.5593/SGEM2011/S20.123
- Parcs, M. d. D. d. d. l. E. e. d. (2012). *Directive 019 sur l'industrie minière*. Québec, QC: Gouvernement du Québec
- Paruchuri, Y., Siuniak, A., Johnson, N., Levin, E., Mitchell, K., Goodrich, J. M., . . . Basu, N. (2010). Occupational and environmental mercury exposure among small-scale gold miners in the Talensi, Nabdram District of Ghana's Upper East region. *Science of The Total Environment*, 408(24), 6079-6085. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.08.022
- Peck, P., & Sinding, K. (2003). Environmental and social disclosure and data richness in the mining industry. *Business Strategy and the Environment*, 12(3), 131-146. doi: 10.1002/bse.358. Repéré à <https://doi.org/10.1002/bse.358>
- Perron, M. (2009). *Quelles alternatives à la croissance infinie?* (Mémoire, Université de sherbrooke, Longueuil, Québec, CA).
- Petavratzi, E., Kingman, S., & Lowndes, I. (2005). Particulates from mining operations: A review of sources, effects and regulations. *Minerals Engineering*, 18, 1183 - 1199. doi: 10.1016/j.mineng.2005.06.017
- Pittock, J., & Lankford, B. A. (2010). Environmental water requirements: demand management in an era of water scarcity. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 7(1), 75-93. doi: 10.1080/19438151003603159
- Pokhrel, L. R., & Dubey, B. (2013). Global scenarios of metal mining, environmental repercussions, public policies, and sustainability: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(21), 2352-2388. doi: 10.1080/10643389.2012.672086
- Poullain, I., & Lespy, F. (2002). *Gestion des risques: guide pratique à l'usage des cadres de santé*. Editions Lamarre.
- Poussin, J. C. (1987). Notion de système et de modèle. *Cahier des Sciences humaines*, 23(3-4), 439-441.
- Prikryl, P., Cerny, R., Havlik, V., Segeth, K., Stupka, P., & Toman, J. (1999). Deposition of waste water into deep mines. *Environmetrics*, 10, 457-466. doi: 10.1002/(SICI)1099-095X(199907/08)10:4<457::AID-ENV367>3.0.CO;2-8
- Qing-gui, C., Ye-jiao, L., Qi-hua, S., & Jian, Z. (2012). Risk management and workers' safety behavior control in coal mine. *Safety Science (Special Issue on the first*

*international symposium on mine safety science and engineering*), 50(4, April), 909 - 913. doi: 10.1016/j.ssci.2011.08.005

Québec. (2017). *Loi sur le développement durable*. (Chapitre D-8.1.1). Québec, QC: Publications du Québec.

Radosavljević, S., & Radosavljević, M. (2009). Risk assessment in mining industry : apply management. *Serbian Journal of Management*, 4(1), 91-104. Repéré à [http://www.sjm06.com/SJM ISSN1452-4864/4\\_1\\_2009\\_May\\_1-136/4\\_1\\_91-104.pdf](http://www.sjm06.com/SJM ISSN1452-4864/4_1_2009_May_1-136/4_1_91-104.pdf)

Ramani, R. V. (1995). Mining disasters caused and controlled by mankind: the case for coal mining and other minerals (Part 1). *Natural resources Forum*, 19(3), 233-242. doi: 10.1111/j.1477-8947.1995.tb00613.x

Ramazan, S., & Dimitrakopoulos, R. (2007). *Stochastic optimisation of long-term production scheduling for open pit mines with a new integer programming formulation* Conference article présentée à Orebody modelling and strategic mine planning, Uncertainty and risk management models - 2nd Edition, Perth, WA, Australia. doi: =10.1.1.483.8807

Rarrbo, L. (2010). *Attribution, valorisation et maintenance des fauteuils roulants par la dynamique des systèmes* (Mémoire, Université Laval, Québec, QC).

Ravengai, S., Love, D., Mabvira-Meck, M., Musiwa, K., & Moyce, W. (2005). Water quality in an abandoned gold mining belt, Beatrice, Sanyati Valley, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(11 - 16), 826–831. doi: 10.1016/j.pce.2005.08.026

Redwood, S. D. (2013). *San Matias Porphyry Copper-Gold Project*. Córdoba, Republic of Colombia: Cordoba Minerals Corp.

Rist, K. (1961). The Solution of a transportation problem by use of a Monte Carlo technique. *Mining world*, 1-15.

Rist, L., Felton, A., Samuelsson, L., Sandström, C., & Rosvall, O. (2013). A new paradigm for adaptive management. *Ecology and Society*, 18(4), 63. doi: 10.5751/ES-06183-180463

Roche ltée. (2000). *Projet minier Niocan Inc. Étude environnementale - Rapport et annexes I à V* (n° 6211-08-003). Sainte-Foy, Québec: Roche ltée.

Roche ltée. (2012). *Projet minier Arnaud Inc. - Étude d'impact sur l'environnement - Volume 1 - Rapport principal* (n° N/Réf: 59858). Québec, QC: Roche ltée.

Rosnay, J. (1975). *Le microscope: vers une vision globale* (Édition du Seuil éd.). Michigan.



- Samimi Namin, F., Shahriar, K., & Bascetin, A. (2011). Environmental impact assessment of mining activities. A new approach for mining methods selection. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27(2), 113-143.
- Senge, P. M. (1990). *The fifth discipline: the art and practice of the learning organization* (2 éd.). New York, USA: Crown Publishing group.
- Sinding, K. (1999). Environmental impact assessment and management in the mining industry. *Natural resources Forum*, 23(1), 57-63. doi: 10.1111/j.1477-8947.1999.tb00238.x
- Singh, K., Ihlenfeld, C., Oates, C., Plant, J., & Voulvoulis, N. (2011). Developing a screening method for the evaluation of environmental and human health risks of synthetic chemicals in the mining industry. *International Journal of Mineral Processing*, 101(1-4), 1-20. doi: 10.1016/j.minpro.2011.07.014
- Skousen, J. G., & Vance, G. F. (2003). Surface water pollution by surface mines. Dans B. A. Stewart & T. Howell (Éds.), *Encyclopedia of Water Science* (pp. 956-960). New York, USA: CRC Press.
- Soni, A. K., & Wolkersdorfer, C. (2016). Mine water: policy perspective for improving water management in the mining environment with respect to developing economies. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30(2), 115-127. doi: 10.1080/17480930.2015.1011372
- St-Hilaire, A., Duchesne, S., & Rousseau, A. N. (2015). Floods and water quality in Canada: A review of the interactions with urbanization, agriculture and forestry. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 1-15. doi: 10.1080/07011784.2015.1010181
- Statcan. (2012). *Industrial Water Use* (Water Statistics n° Catalogue no. 16-401-X). Ottawa, ON, Canada: Statistics Canada.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics : Systems thinking and modelling for a complex world* (Vol. Har/Cdr). USA: Irwin-Mcgraw-Hill Higher Education.
- Stumm, W., Gherini, S., & Forsberg, M. (2006). Water : properties, structure, and occurrence in nature. Dans J. R. Pfafflin & E. N. Ziegler (Éds.), *Encyclopedia of Environmental Science and Engineering* (Fifth Edition éd., Vol. Volumes 1 and 2, pp. 1289–1306). Floride, FL: CRC Press, Taylor & Francis. doi: 10.1201/NOE0849398438.ch85
- Sturgul, J. (1997). History of discrete mine simulation. Dans G. N. Panagiotou & J. R. Sturgul (Éds.), *First International Symposium on Mine Simulation (MINESIM '96)* (pp. 27). Rotterdam, Holland: Balkema publishing company.

- Sturgul, J. R. (2001). Modeling and simulation in mining - its time has finally arrived. *Simulation*, 76(5), 286-288. doi: 10.1177/003754970107600509
- Tamba Takam, B. A. (2017). *Corruption, croissance économique et dégradation de la qualité environnementale dans les pays de la zone CEMAC* (Maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke).
- Tannant, D. D. (2015). Changes to dam safety management in British Columbia triggered by failure of a small earth dam. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 9(3), 148-157. doi: 10.1080/17499518.2015.1055278
- Tanner, J. L., & Hughes, D. A. (2015). Surface water–groundwater interactions in catchment scale water resources assessments—understanding and hypothesis testing with a hydrological model. *Hydrological Sciences Journal, Special issue*(African Hydrology Research), 1-16. doi: DOI: 10.1080/02626667.2015.1052453
- Teparut, C., & Sthiannopkao, S. (2011). Mae Moh lignite mine and environmental management. *Geosystem Engineering*, 14(2), 85-94. doi: 10.1080/12269328.2011.10541335
- Turner, R. J. (1999). Simulation in the mining industry of South Africa. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13(2), 47-56. doi: 10.1080/09208119908944209
- UNECA. (2009). *Africa's mining regimes: framework report*. International Study Group of the AU & UNECA.
- URBIS. (2013). *Mt Arthur coal open cut modification- Landscape and visual impact assessment* (n° MD 3212- URBIS00492570). Australia: Hunter Valley Energy Coal
- Vielma, J. P., Espinoza, D., & Moreno, E. (2009). Risk control in ultimate pits using conditional simulations. Dans *34th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industry (APCOM 2009)* (pp. 107-114). APCOM. Repéré à <http://www.mit.edu/~jvielma/publications/Risk-Control-in-Ultimate.pdf>
- Widmark, S. (2012). Modeling physical systems using vensim PLE systems dynamics software. *Physics Teacher*, 50(2), 105-108. doi: DOI: 10.1119/1.3677287
- Wiehagen, W. J., & Turin, F. C. (2004). *Ergonomic assessment of musculoskeletal risk factors at four mine sites: Underground coal, surface copper, surface phosphate, and underground limestone - Publication No. 2004-159*. Repéré à <http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pubreference/outputid82.htm>

- WSP Global. (2015). *Projet Akasaba Ouest, Étude d'impact environnemental et social. Volume 1 - Rapport principal* (ÉIE n° RÉF : N° 1203-REP-002). Montréal, QC: WSP group pour Mines Agnico Eagle ltée.
- Wu, D., Xie, K., Hua, L., Shi, Z., & Olson, D. L. (2010). Modeling technological innovation risks of an entrepreneurial team using system dynamics: an agent-based perspective. *Technology forecasting and social change*, 77(6), 857-869. doi: 10.1016/j.techfore.2010.01.015
- Xiao-ping, B., Yu-hong, Z., & Ya-nan, L. (2015). A novel approach to study real-time dynamic optimization analysis and simulation of complex mine logistics transportation hybrid system with belt and surge links. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 8. doi: 10.1155/2015/601578
- Yerel, S., & Ersen, T. (2013). Prediction of the calorific value of coal deposit using linear regression analysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(10), 976-980. doi: 10.1080/15567036.2010.514595
- Yu, C., & Yao, W. (2016). Robust linear regression: A review and comparison. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 1-38. doi: 10.1080/03610918.2016.1202271
- Yu, C. H., Chen, C. H., Lin, C. F., & Liaw, S. L. (2003). Development of a system dynamics model for sustainable land use management. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26(5), 607-618. doi: 10.1080/02533839.2003.9670815
- Yuriy, G. M. (2005). *Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model* (Master, Laurentian University/Université Laurentienne, Sudbury, ON). Repéré à <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/001/mr01119.pdf>
- Zeng, S. X., Shi, J. J., & Lou, G. X. (2007). A synergetic model for implementing an integrated management system : an empirical study in China. *Journal of Cleaner Production*, 15(18, May), 1760-1767. doi: 10.1016/j.jclepro.2006.03.007
- Zeng, S. X., Tam, C. M., & Tam, V. W. Y. (2010). Integrating safety, environmental and quality risks for project management using a FMEA method. *Economics of engineering decisions*, 21(1), 44-52. Repéré à <http://internet.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/inzeko/66/1392-2758-2010-21-1-44.pdf>

