

2004

Conception des cheminées à minerai et à stérile

John Hadjigeorgiou
Université Laval

Jean-François Lessard
Université Laval

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

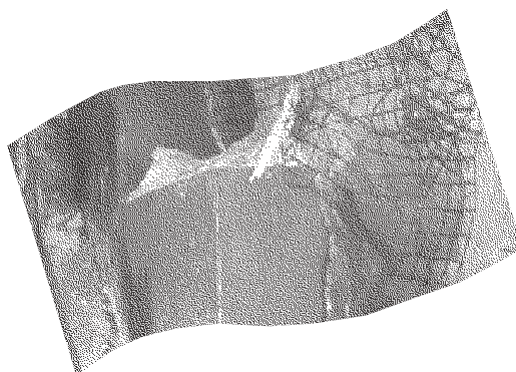
Hadjigeorgiou, J. et Lessard, J.-F. (2004). *Conception des cheminées à minerai et à stérile* (Rapport n° R-380). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Conception des cheminées à minerai et à stérile

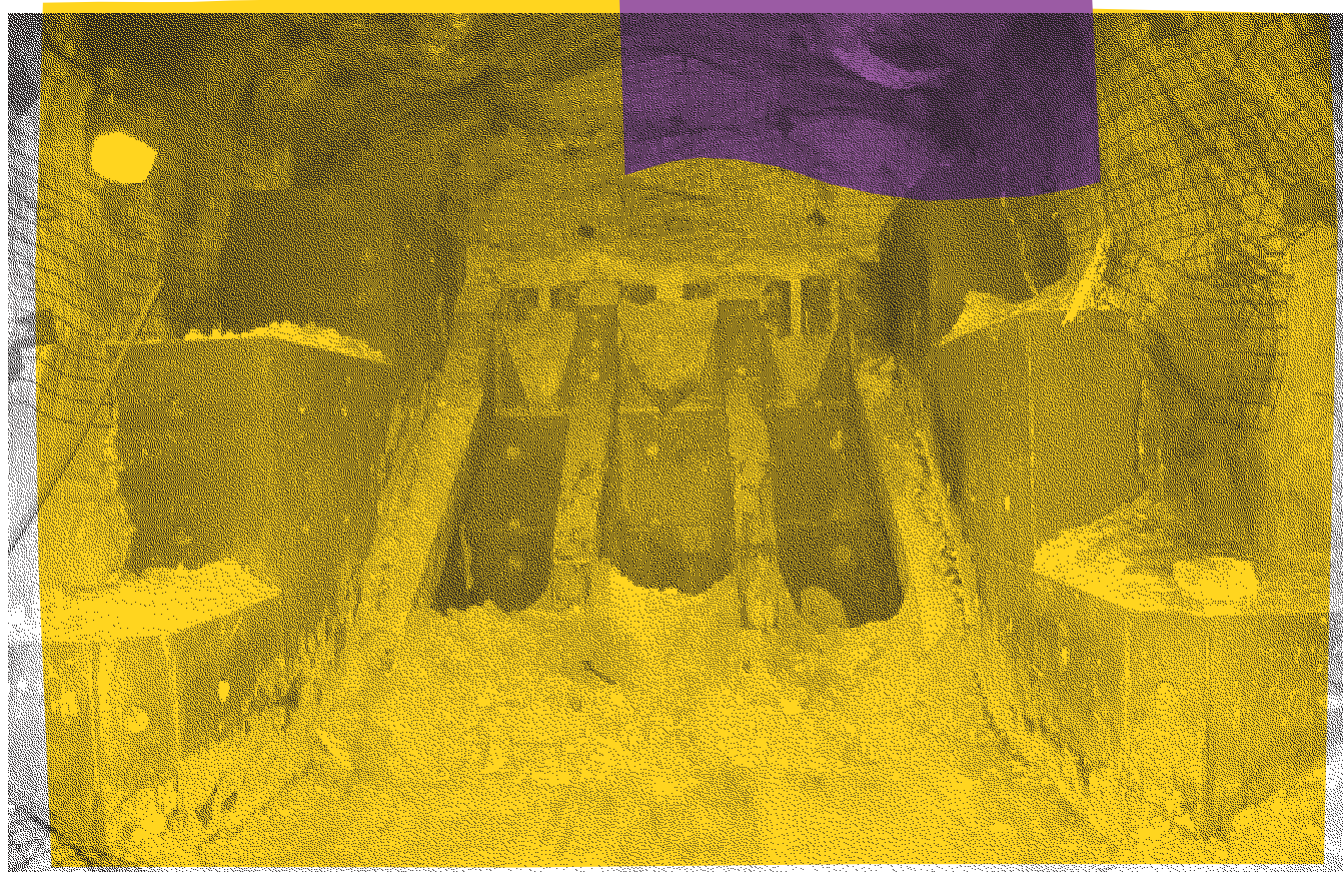
John Hadjigeorgiou
Jean-François Lessard

ÉTUDES ET RECHERCHES



R-380

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
septembre 2004

Conception des cheminées à minerai et à stérile

John Hadjigeorgiou et Jean-François Lessard
Département de génie des mines,
de la métallurgie et des matériaux, Université Laval

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

La manutention du minerai et du stérile dans la plupart des mines souterraines repose sur un système de cheminées à minerai. Ces cheminées ont pour but de transférer, par gravité, le minerai depuis les niveaux supérieurs de la mine jusqu'au niveau de concassage et de hissage.

L'expérience a montré que les cheminées sont fréquemment aux prises avec des problèmes d'écoulement de même qu'avec des problèmes de stabilité. Les problèmes de stabilité sont causés, entre autre, par le régime de contraintes et, principalement, par les structures en place dans le massif rocheux. Les impacts et l'usure par abrasion au niveau des parois provoqués par le matériel en mouvement, participent aussi à la détérioration des cheminées. Ces problèmes opérationnels reliés à l'utilisation des cheminées ont un impact économique très important, pouvant aller jusqu'à l'arrêt des opérations.

Les opérations reliées à l'utilisation des cheminées à minerai dans les mines souterraines posent actuellement un problème au niveau de la sécurité des travailleurs. Au Québec, entre 1987 et 1999, 60 accidents, dont 9 accidents mortels, ont été recensés par l'APSM (Lapointe, 1999) relativement à l'opération des cheminées à minerai dans les mines souterraines. En Ontario, selon le MASHA (Beauchamp, 1999), pour la période de 1989 à 1999, on dénombrait 33 accidents dont 4 se sont avérés mortels. Aux États-Unis, 392 accidents, dont 3 mortels, ont été recensés entre 1987 et 1996, (Larson et al., 1998).

Il n'existe que très peu de littérature technique traitant de la conception des cheminées à minerai ou des problèmes qui y sont associés (Stacey & Swart, 1997). Actuellement, la plupart des cheminées à minerai sont planifiées de façon empirique, c'est-à-dire que la conception est basée principalement sur l'expérience passée. Cette méthodologie empirique fait en sorte qu'il est difficile de comprendre pourquoi dans certain cas une cheminée à minerai a bien fonctionné alors que dans un autre cas, une cheminée de conception identique a été associée à de nombreux problèmes (accrochages, dégradation, etc.).

Les objectifs du projet, tels que définis dans le protocole présenté à l'IRSST, étaient les suivants :

- l'étude de la situation actuelle au Québec concernant la conception des cheminées à minerai, les problèmes opérationnels rencontrés, les solutions apportées pour y remédier ainsi que les résultats obtenus.
- l'élaboration d'un guide de conception des cheminées à minerai.
- l'élaboration d'une liste de méthodes de travail sécuritaires reliées à l'opération des cheminées à minerai.

Dix mines souterraines du Québec ont été visitées afin de constituer une base de données sur les cheminées à minerai et à stérile. Une investigation typique comprenait une descente sous terre et une collecte extensive d'informations relatives à l'ingénierie des cheminées, principalement en fonction des plans disponibles dans chaque mine. Une série d'entrevues a aussi été réalisée avec

le personnel des départements d'ingénierie afin de recueillir de l'information sur la conception des cheminées. L'analyse de la base de données ainsi constituée a permis de faire une mise à jour en ce qui concerne la conception des cheminées à minerai de même que les problèmes opérationnels rencontrés. Les résultats ont permis d'établir des lignes directrices afin de mieux concevoir les cheminées à minerai.

L'influence de la forme et de l'inclinaison des cheminées sur la formation d'accrochage a été évaluée à l'aide d'un modèle numérique basé sur la méthode des éléments distincts. Les abaques de dimensionnement des cheminées élaborés dans le cadre de ce projet sont un outil de travail très intéressant pour l'ingénieur minier.

La base de données a également permis d'identifier les types de massifs rocheux aptes à recevoir les cheminées. Une valeur critique de la classification du NGI, à partir de laquelle des problèmes de dégradation des parois sont à envisager, a été établie. Une telle classification n'a jamais été proposée à la connaissance des auteurs.

Les entrevues menées avec le personnel affecté aux opérations souterraines a permis d'élaborer une liste des différentes méthodes sécuritaires de travail reliées aux opérations de démantèlement des accrochages (nommées ci-après « déblocages ») et de réhabilitation des cheminées. Un guide synthétisant les différentes méthodes de déblocage a été élaboré à destination des mineurs dans le cadre de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Définition du problème	1
1.2 État des connaissances	3
1.3 Objectifs du projet	4
2. MÉTHODOLOGIE	6
2.1 Création et analyse d'une base de données	6
2.2 Caractérisation du matériel	8
2.2.1 Distribution granulométrique du matériel.....	9
2.2.2 Caractérisation du matériel fin.....	10
2.3 Évaluation analytique de l'influence de la dimension des cheminées sur les accrochages par arche cohésive.....	10
2.4 Analyse numérique de l'influence de la géométrie des cheminées sur les accrochages ..	11
2.4.1 Particle Flow Code (PFC).....	12
2.4.2 Méthodologie utilisée pour les simulations.	13
2.5 Évaluation de la stabilité des parois en fonction du régime de contraintes.	14
3. RÉSULTATS.....	17
3.1 Élaboration d'une méthodologie de conception des cheminées à minerai et à stérile.....	17
3.2 Classification des méthodes de déblocage et de réhabilitation des cheminées	18
3.3 Classification des méthodes de réhabilitation des cheminées	19
4. DISCUSSION	19
5. CONCLUSIONS	20
5.1 Applicabilité des résultats.....	21
5.2 Retombées du projet	21
6. ÉCHANGES ET DISSÉMINATION DE L'INFORMATION.....	22
6.1 Présentations dans le cadre du projet actuel	22
6.2 Collaboration en cours	23
7. RÉFÉRENCES.....	23

1. INTRODUCTION

1.1 Position du problème

La manutention du minerai et du stérile dans la plupart des mines souterraines est basée sur un réseau d'excavations verticales ou inclinées, nommées cheminées à minerai ou cheminées à stérile, selon le cas. Ces cheminées, illustrées à la Figure 1.1, permettent de transférer le minerai des niveaux supérieurs de la mine aux niveaux inférieurs.

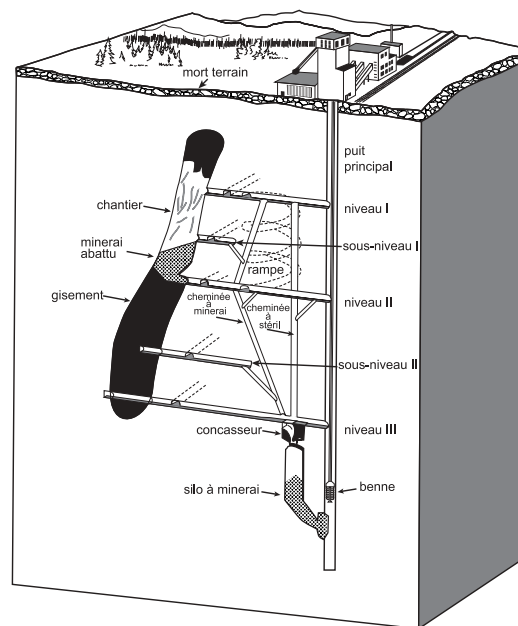


Figure 1.1. Système de manutention du minerai dans une mine souterraine.

L'expérience a toutefois montré que les cheminées sont fréquemment aux prises avec des problèmes d'écoulement de même qu'avec des problèmes de stabilité. Ces problèmes de stabilité sont causés, entre autre, par le régime de contraintes et, principalement, par les structures en place dans le massif rocheux. Le matériel en mouvement entraîne des impacts et une usure par abrasion des parois, participant ainsi à la détérioration des cheminées. Ces problèmes opérationnels reliés à l'utilisation des cheminées ont un impact économique très important, pouvant aller jusqu'à l'arrêt des opérations.

Les opérations reliées à l'utilisation des cheminées à minerai dans les mines souterraines posent actuellement un problème au niveau de la sécurité des travailleurs. Au Québec, entre 1987 et 1999, 60 accidents, dont 9 accidents mortels, ont été recensés par l'APSM (Lapointe, 1999) relativement à l'opération des cheminées à minerai dans les mines souterraines. En Ontario, selon le MASHA (Beauchamp, 1999), pour la période de 1989 à 1999, on dénombrait 33

accidents dont 4 se sont avérés mortels. Aux États-Unis, 392 accidents, dont 3 mortels, ont été recensés entre 1987 et 1996, (Larson et al., 1998).

Les problèmes relatifs à l'écoulement du matériel sont principalement causés par les phénomènes d'accrochage, une obstruction involontaire qui empêche le libre écoulement du minerai dans une cheminée. Ces accrochages peuvent être le résultat d'un enchevêtrement rocheux dans le cas où le minerai est majoritairement constitué de matériel grossier (cf. Figure 1.2a). Dans le cas d'un minerai comportant une forte proportion de fines, les accrochages seront causés par la formation d'une arche cohésive (cf. Figure 1.2b).

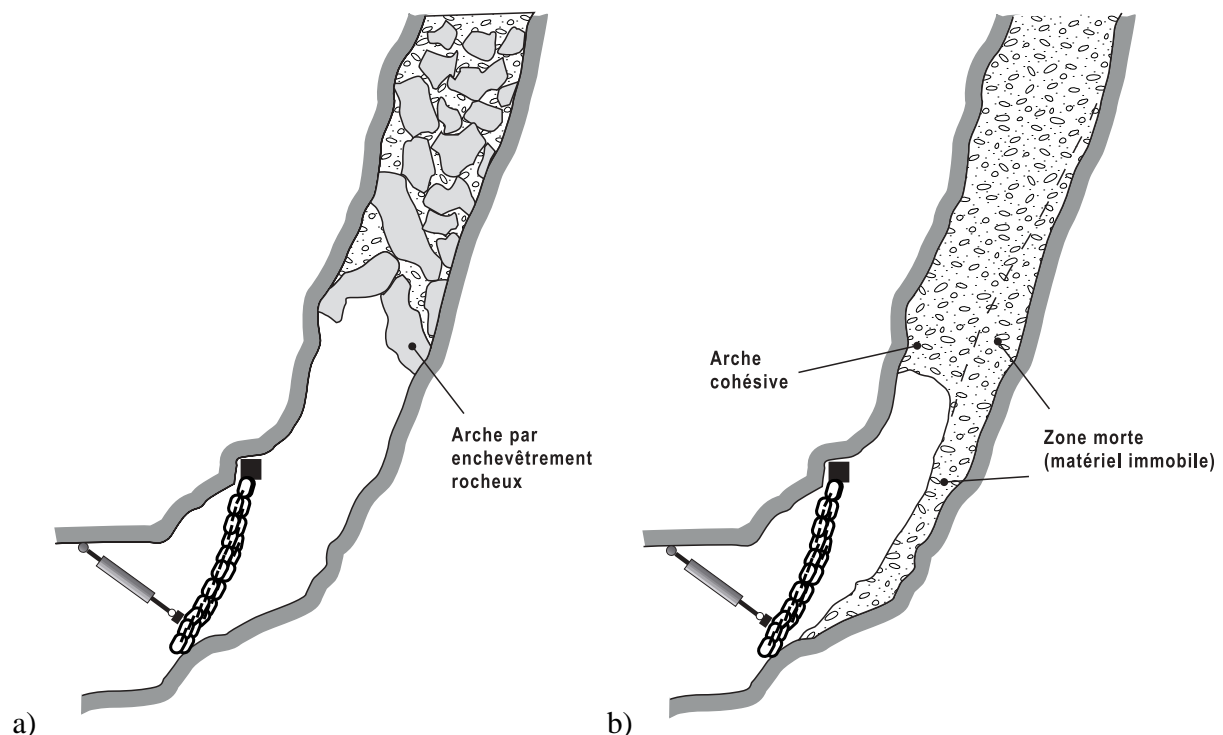


Figure 1.2. Accrochages par: a) enchevêtrement rocheux; b) arche cohésive.

0

Ces accrochages sont fréquemment rencontrés dans plusieurs opérations minières. Lorsque ce phénomène se produit, il faut débloquer la cheminée à minerai le plus rapidement possible afin de rétablir l'écoulement du matériel et ainsi permettre la poursuite des activités de hissage du minerai. La réalisation de cette opération est plus ou moins difficile, selon la localisation de l'accrochage. Il existe plusieurs méthodes de déblocage des cheminées, certaines sont sécuritaires tandis que d'autres sont plus risquées pour les opérateurs. Les accrochages par formation d'arches cohésives sont propices à l'accumulation d'eau d'infiltration dans la cheminée. Cette condition, si elle n'est pas détectée par les opérateurs, peut rendre les opérations de déblocage particulièrement dangereuses, indépendamment de la méthode utilisée, à cause d'une probable coulée de boue (mud rush) qui risquerait de se produire lors du déblocage. Au Québec, la majorité des accidents mortels ou impliquant des blessures se produisent lors des opérations de déblocage des cheminées à minerai.

La dégradation des parois des cheminées à minerai est, au même titre que les accrochages, un problème fréquent dans les mines souterraines. La dégradation des parois des cheminées à minerai joue un rôle majeur dans le phénomène des accrochages. L'expérience montre bien en effet que la fréquence des obstructions augmente considérablement dans les cheminées dont les parois ont commencé à se dégrader.

La vitesse à laquelle s'effectue la dégradation des parois augmente presque de façon exponentielle puisque le volume croissant de la cheminée dégradée permet le détachement de blocs de plus en plus gros. À un certain niveau de dégradation, l'utilisation de la cheminée devient impossible, soit parce que les accrochages sont trop fréquents ou bien parce que l'agrandissement du volume de la cheminée devient une menace pour la stabilité des ouvertures environnantes. Il faudrait en ce moment là évaluer la pertinence d'y effectuer des travaux de réparation. Ces réparations impliqueraient la présence de travailleurs à l'intérieur de la cheminée à minerai, ainsi exposés à un niveau de risque plus élevé comparé à celui associé aux autres travaux sous terre.

1.2 État des connaissances

Il n'existe que très peu de littérature technique traitant de la conception des cheminées à minerai ou des problèmes qui y sont associés (Stacey & Swart, 1997). Actuellement, la plupart des cheminées à minerai sont planifiées de manière empirique, i.e. que la conception est basée principalement sur l'expérience passée. Cette méthodologie empirique fait en sorte qu'il est difficile de comprendre pourquoi dans certain cas une cheminée à minerai a bien fonctionné alors que dans un autre cas, une cheminée de conception identique a été associée à de nombreux problèmes (accrochages, dégradation, etc.). À ce jour, les principaux travaux sur la conception des cheminées à minerai étaient basés sur les méthodes de conception des silos (Hambley, 1987). Les conditions rencontrées dans les silos sont toutefois très différentes de celles rencontrées dans les cheminées à minerai, en particulier en ce qui concerne la vitesse du matériau qui y circule. En effet, les silos servant principalement à stocker le matériel tandis que les cheminées servent à transférer le matériau. Le Tableau 1.1 synthétise l'état actuel des connaissances en ce qui concerne les problèmes d'écoulement du matériel dans les cheminées.

La plupart des travaux réalisés sur l'écoulement du minerai dans les cheminées ont été effectués analytiquement. La disponibilité de nouveaux modèles numériques par éléments distincts permet d'analyser l'écoulement et les phénomènes d'accrochage sous un nouvel angle.

Tableau 1.1. État des connaissances des problèmes reliés à l'utilisation des cheminées

Problème	Compréhension du phénomène	Méthode d'analyses disponibles	Solutions disponibles
Écoulement du minerai			
Accrochages par enchevêtrement rocheux	Faible	Méthodes numériques par éléments distincts Modèles physiques	Solutions empiriques de dimensionnement des cheminées (Hambley et al. 1983)
Accrochages par arche cohésive	Moyenne	Méthodes numériques par éléments distincts Modèles physiques Modèles analytiques	Solutions analytiques de dimensionnement des cheminées (Hambley et al. 1983)

Trois revues majeures sur les pratiques actuelles en ce qui concerne la conception des cheminées à minerai ont été réalisées depuis 1991. Ces travaux ont été réalisés au Canada par le "Mining Research Directorate (MRD)" (Ferguson, 1991) et le "Canadian Mining Research Organisation (CAMIRO)" (Brummer, 1998) et en Afrique du Sud par le "Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC)" (Stacey & Swart, 1997). Plusieurs mines souterraines furent visitées lors de ces projets. Les travaux du SIMRAC ne sont pas vraiment représentatifs en ce qui nous concerne car le contexte général (géologie, méthode de minage, etc.) entourant les mines d'Afrique du Sud est très différent de celui du Québec. Les rapports du MRD et du CAMIRO reflètent mieux la situation des mines souterraines du bassin de Sudbury. Ces mines sont pour la plupart aux prises avec des problèmes reliés aux contraintes élevées. Ils ne reflètent donc pas très bien la situation des mines québécoises qui, pour la plupart ne rencontrent pas de tels problèmes.

1.3 Objectifs du projet

Les objectifs du projet, tels que définis dans le protocole présenté à l'IRSST, étaient les suivants :

Objectifs principaux :

- l'étude de la situation actuelle au Québec sur la conception des cheminées à minerai, les problèmes opérationnels rencontrés, les solutions apportées pour y remédier ainsi que les résultats obtenus.
- l'élaboration d'un guide de conception des cheminées à minerai.
- l'élaboration d'une liste de méthodes de travail sécuritaires reliées à l'opération des cheminées à minerai.

Objectifs spécifiques :

Les objectifs spécifiques à l'élaboration d'un guide de conception des cheminées à minerai sont le développement de lignes directrices permettant de :

- localiser adéquatement les cheminées à minerai dans des terrains compétents,
- dimensionner adéquatement le diamètre et la longueur des cheminées à minerai afin de réduire ou d'éliminer :
 - les accrochages par enchevêtrement rocheux,
 - les accrochages par formation d'arches de minerai cohésif,
- évaluer le type de support requis :
 - pour empêcher la dégradation rapide des parois des cheminées à minerai en présence de structures géologiques défavorables,
 - dans le cas des cheminées à minerai dans des terrains sous fortes contraintes,
- évaluer la pertinence d'utiliser un revêtement protecteur lorsque le massif rocheux n'est pas assez compétent,
- élaborer une stratégie de monitoring de la condition des cheminées à minerai,

Les objectifs spécifiques à l'élaboration d'une liste de méthodes de travail sécuritaires visent à développer des lignes directrices permettant :

- d'effectuer les opérations de déblocage des cheminées à minerai de manière sécuritaire,
- de réaliser des travaux d'entretien ou de réparation à l'intérieur des cheminées à minerai de façon sécuritaire.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Création et analyse d'une base de données

Dix mines souterraines du Québec ont été visitées afin de constituer une base de données sur les cheminées à minerai et à stérile. Les mines visitées lors de ce projet sont présentées dans le Tableau 2.1. Leur situation géographique est illustrée sur la Figure 2.1. La moitié des mines visitées étaient des mines de métaux usuels, l'autre moitié étant des mines d'or.

Tableau 2.1. Sites miniers visités.

Mine	Minerai extrait	Tonnage (t/j)
Mine Louvicourt (Aur Ressources)	cuivre, zinc, or, argent	4 300
Mine Bell Allard (Noranda)	zinc, cuivre	2 200
Mine Bouchard-Hébert (Breakwater Ressources)	zinc, cuivre, or, argent	3 000
Mine Langlois (Breakwater Resources)	zinc, cuivre, argent, or	1 500
Mine Niobec (TMG)	niobium	3 300
Mine Bousquet 2 (Barrick)	or	1 700
Mine Doyon (Cambior)	or	3 500
Mine Mouska (Cambior)	or, argent	450
Mine Kiéna (Les Mines MacWatters)	or, argent	2 000
Mine Laronde (Agnico Eagle)	or, zinc, cuivre	5 000

Une investigation typique comprenait une descente sous terre et une collecte extensive d'informations relatives à l'ingénierie des cheminées, principalement en fonction des plans disponibles à la mine. Une série d'entrevues étaient aussi réalisées avec le personnel du département de l'ingénierie afin de recueillir de l'information sur la conception des cheminées. Le personnel des départements de la production et de la formation était aussi interviewé afin de collecter des renseignements sur les problèmes opérationnels rencontrés ainsi que sur les méthodes de déblocage utilisées à la mine. Un questionnaire a été élaboré préalablement à la réalisation de la campagne de collecte de données afin de faciliter et d'uniformiser le processus des interviews.

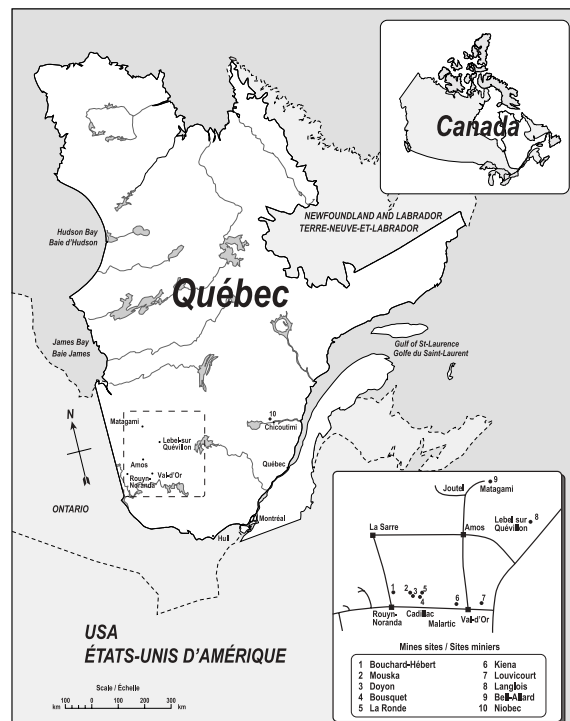


Figure 2.1. Localisation des mines visitées.

L'ensemble des mines visitées est situé dans le bouclier canadien. Cette formation géologique couvre près de la moitié du Canada et est principalement composée de roches métamorphiques du Précambrien. À l'exception de la mine Niobec, toutes les mines sont situées dans la ceinture des Roches Vertes abitibiennes. Cette ceinture mesure environ 300 km dans son axe nord-sud et environ 400 km d'est en ouest. Cette ceinture est composée d'une association de roches métavolcaniques, métasédimentaires et d'inclusions felsiques à ultramafiques. L'analyse de la base de données a été présentée dans Lessard et Hadjigeorgiou (2003).

D'autres revues sur la conception des cheminées ont été constituées précédemment. Stacey et Swart (1997) et Hagan et Acheampong (1999) ont effectué des revues sur les pratiques courantes en ingénierie des cheminées à minerai dans 11 mines en Afrique du Sud. Leurs travaux ont aussi permis l'identification des problèmes opérationnels reliés à l'utilisation des cheminées à minerai. Ferguson (1991) a effectué une revue de l'expérience canadienne en ce qui concerne les cheminées à minerai. La plupart des 10 mines constituant la base de données de ses travaux sont toutefois situées en Ontario dans un environnement où les contraintes in-situ sont élevées. Brummer (1998) a rajouté 2 mines à la revue effectuée par Ferguson (1991) dans le cadre de travaux sur la détermination de la vie utile des cheminées.

Il apparaît clairement que l'expérience de l'Afrique du Sud est très différente de l'expérience canadienne en ce qui concerne l'ingénierie des cheminées. La plupart des cheminées des mines sud africaines sont excavées par alésage et ne comporte aucun support. Les pratiques canadiennes, au contraire, font en sorte que la plupart des cheminées soient excavées par forage et sautage. L'aspect géologique des gisements sud-africains est aussi foncièrement différent de celui rencontré au Canada.

La base de données constituée par Ferguson (1991) contient un nombre important de mines sismiquement très actives, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les mines souterraines du Québec. Une base de données sur l'ingénierie et la performance des cheminées à minerai et à stérile, dans le contexte d'un milieu où les contraintes existantes seront considérées comme normales, est donc nécessaire. La faiblesse principale des revues effectuées par Stacey et Swart (1997), Hagan et Acheampong (1999), Ferguson (1991) et Brummer (1998) est le manque de données par rapport à la caractérisation du matériel déversé dans les cheminées. Une attention particulière à la caractérisation du matériel a donc été portée lors de la réalisation de la base de données constituée dans ce projet.

2.2 Caractérisation du matériel

Dans le cas de l'écoulement gravitaire du matériel rocheux dans les cheminées, les caractéristiques tel la dimension maximale des fragments rocheux, le pourcentage de matériel fin, la résistance au cisaillement et la cohésion de la fraction fine du matériel vont influencer l'écoulement du matériel (Hambley et al., 1983). La distribution granulométrique du matériel circulant dans les cheminées a été réalisée sur le terrain à partir de Wipfrag, un logiciel d'analyse d'image disponible commercialement. La résistance au cisaillement et la cohésion ont été évaluées à partir de tests en laboratoire.

2.2.1 Distribution granulométrique du matériel

La distribution granulométrique du minerai des chantiers de 8 des 10 mines visitées a été évaluée par analyse d'images sur des photos prises dans les points de soutirage des chantiers.

La Figure 2.2 présente un exemple typique de la granulométrie rencontrée dans les points de soutirage des mines visitées.

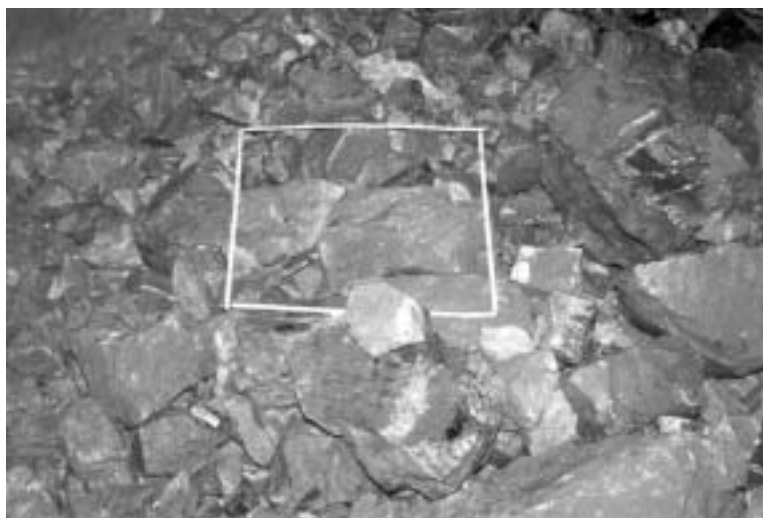


Figure 2.2. Minerai abattu de la mine Niobec.

Les photographies de la fragmentation dans les points de soutirage ont permis d'évaluer la distribution granulométrique du matériel déversé dans les cheminées. Le logiciel Wipfrag de Wipware (2001), a été utilisé à cette fin. Wipfrag possède une fonction de reconnaissance d'image afin de détecter les arrêtes et les creux pour ainsi générer automatiquement un contour des blocs rocheux. Ce contour permet d'évaluer ensuite la distribution de la dimension des fragments rocheux. Il est possible de modifier manuellement les contours générés afin de corriger les erreurs de détections. Ces erreurs de détection sont relativement fréquentes dans le cas des photos prises sous terre car les conditions d'éclairage sont généralement insuffisantes lors de l'utilisation d'un flash monté sur la caméra uniquement. Wipfrag utilise ensuite des principes stéréologiques pour convertir les contours 2D en une distribution de volume 3D.

Un des problèmes inhérents aux méthodologies évaluant la distribution granulométrique à partir d'analyse d'images est la sous-estimation de la fraction fine du matériel. Wipfrag permet de compenser ce phénomène en effectuant une correction de Rosin-Rammler. Cette technique de correction a été utilisée ici selon la méthodologie proposée par Maerz et Zhou (1999).

2.2.2 Caractérisation du matériel fin

Une série d'essais de cisaillement direct à l'aide d'une boîte de cisaillement a été réalisée selon la norme ASTM D 3080. La fraction de matériel passant 3,3 mm (ouverture d'un tamis 6 mesh) a été testée pour les minerais provenant de Bell-Allard, Bousquet et Mouska. Les tests ont été effectués pour des teneurs en eau de 4, 8 et 12% pour chacun des échantillons afin d'évaluer l'influence de la teneur en eau sur l'angle de friction et la cohésion du matériel testé.

2.3 Évaluation analytique de l'influence de la dimension des cheminées sur les accrochages par arche cohésive

Les arches cohésives sont le résultat de la cohésion exhibée par le matériel fin (Hambley et al. 1983). Généralement, les règles de classifications des sols (ASTM D-411 et D-653, AASHTO T-88 et USCS) définissent les fines comme les matériaux silteux et argileux soit le matériel passant 0,07 mm (200 mesh). Dans le cas de la manutention des matériaux, cette définition du matériel fin est plus arbitraire. Kvapil (1965) définit le matériel cohésif en accord avec les classifications des sols, soit un passant de 0,07 mm. Jenike (1961) définit le matériel fin dans le cas de la manutention des matériaux comme étant un passant de 0,25 mm (65 mesh).

Il est évidemment peu probable que le matériel provenant des sautages et circulant dans les cheminées soit majoritairement constitué de matériel inférieur à 65 mesh, encore moins inférieur à 200 mesh. Toutefois, le comportement du matériel est fortement influencé par sa fraction de matériel fin. Kvapil (1965) suggèrent donc qu'une proportion de fines (< 0,07 mm) supérieure à 10% risque de rendre impossible le transport dans les cheminées. Jenike (1961) suggère qu'une proportion de fines (< 0,25 mm) dans le matériel égale à 10% poids entraîne un comportement cohésif du matériel. Stacey et Swart (1997) et Beus et al. (2001) suggèrent à cet effet une proportion de fines égale ou supérieure à 20% en poids sans toutefois définir clairement la dimension du matériel fin. Jenike (2003) redéfinit le matériel fin dans le cas des matériaux rocheux fragmenté comme étant < 4 mm. D'après l'auteur, un matériel comprenant une proportion égale à 10% en poids pourra avoir un comportement cohésif.

Hambley et al. (1983), considérant le matériel dans la cheminée comme un milieu continu, ont proposé la relation analytique suivante afin d'évaluer la dimension minimale d'une cheminée à minerai verticale afin de prévenir la formation d'arches cohésives:

$$D > (2c / \gamma)(1 + 1/r)(1 + \sin \phi)$$

Où:

- D = diamètre ou largeur de la cheminée (m)
- c = cohésion des fines (kPa)
- γ = poids volumique des fines (kN/m³)
- r = rapport longueur/largeur de la cheminée
- ϕ = angle de frottement interne des fines (degrés)

Selon Hambley et al. (1983), la teneur en eau dans le matériel fin influence grandement la cohésion et l'angle de friction interne de celui-ci. Il est donc suggéré d'évaluer ces paramètres sur un matériel ayant la même teneur en eau que celle risquant d'être rencontrée sur le terrain.

Stacey et Swart (1997) ont proposé l'abaque présenté à la Figure 2.3 pour le dimensionnement des cheminées afin de réduire les risques de formation d'arches cohésives. Cet abaque est en fait une simplification de la méthodologie proposée par Hambley et al. (1983) dans laquelle, les auteurs ont émis l'hypothèse d'un angle de frottement interne des fines de 45° et d'un poids volumique de 27 kN/m^3 .

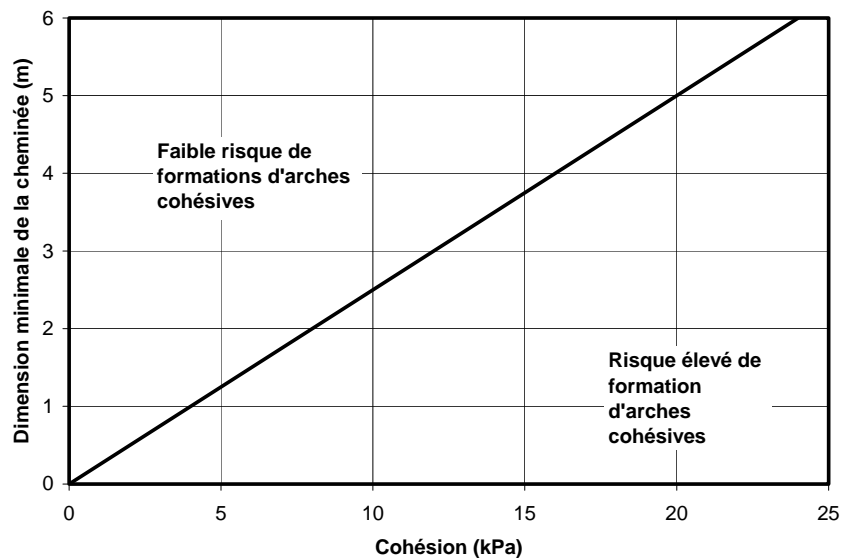


Figure 2.3. Dimension minimale requise afin d'éviter la formation d'arches cohésives (d'après Stacey et Swart, 1997)

Une rétro-analyse sur 133 sections contenues dans la base de données a donc été effectuée à l'aide de la méthode analytique simplifiée de Stacey et Swart (1997). Les sections ayant des arches cohésives occasionnelles ont été identifiées en fonction des commentaires reçus de la part des opérateurs. Une version adaptée de cet abaque (Figure 2.3) en fonction des résultats de terrains est proposée dans le « Guide de conception des cheminées à minerai et à stérile ».

2.4 Analyse numérique de l'influence de la géométrie des cheminées sur les accrochages

Une compréhension de l'écoulement du matériel dans les cheminées est importante afin d'améliorer les pratiques courantes de conception et de minimiser les accrochages. La plupart des travaux sur l'écoulement du minerai utilisent des modèles à petite échelle en laboratoire afin de développer des solutions analytiques. Ces modèles ont toutefois des limites puisqu'ils ne peuvent reproduire exactement l'écoulement dans les cheminées étant donné les différences

considérables entre le modèle et les conditions réelles au niveau de la forme et de la granulométrie du matériel, de la dimension réelle des cheminées, des conditions aux frontières, etc. Des essais sur le terrain seraient trop coûteux à réaliser et, de plus, impliqueraient des arrêts de production. Dans le meilleur des cas, ce type d'essais ne procurerait que des informations très localisées et spécifiques. Une solution numérique est attrayante et plus envisageable afin d'étudier l'écoulement du matériel dans le cas de l'écoulement du minéral grossier.

La méthode des éléments distincts, par exemple, modélise le mouvement dynamique et les interactions mécaniques entre chaque élément d'une simulation. Cette méthode permet d'évaluer les forces agissant sur chacun des éléments de même que leur position et leur vitesse. Cette évaluation est effectuée pour chacun des cycles, ou « time steps », d'une simulation. Cette méthode permet de modéliser de grands déplacements pour chacun des éléments. Elle est donc bien adaptée pour simuler la mécanique des écoulements granulaires. Cette méthode se prête naturellement à la simulation des écoulements du matériel dans une cheminée à minéral. Il est possible d'affirmer que le Particle Flow Code (Itasca, 2000) est un des codes numériques les plus robustes pouvant être utilisé pour simuler l'écoulement du matériel dans les cheminées.

2.4.1 Particle Flow Code (PFC)

Le Particle Flow Code (PFC) est basé sur la méthode des éléments distincts et a été utilisé pour modéliser l'écoulement du matériel granulaire. Les particules sont représentées par des formes circulaires en 2D (PFC2D) et sphériques en 3D (PFC3D). Il est toutefois possible d'effectuer des assemblages de ces particules élémentaires pour créer des particules aux formes plus complexes.

Le principe de fonctionnement du Particle Flow Code est présenté de façon conceptuelle à la Figure 2.4. Le code PFC divise le temps réel en incrément, appelé cycle. Pour chacun des cycles, le modèle évalue la position de chacune des particules en fonction des forces agissantes à l'aide des équations du mouvement de Newton. PFC vérifie ensuite les nouveaux contacts créés entre les particules en fonction de leur nouvelle position. Les forces résultantes de ces nouveaux contacts sont alors mises à jour pour chacune des particules. Le prochain cycle de calcul recommence alors avec la mise à jour de la position des particules. Le principe de calcul est simple mais le code PFC est très robuste. Par contre, les calculs requis pour la détection des nouveaux contacts sont intensifs. Le temps requis pour effectuer une modélisation est évidemment proportionnel au nombre de particules générées.

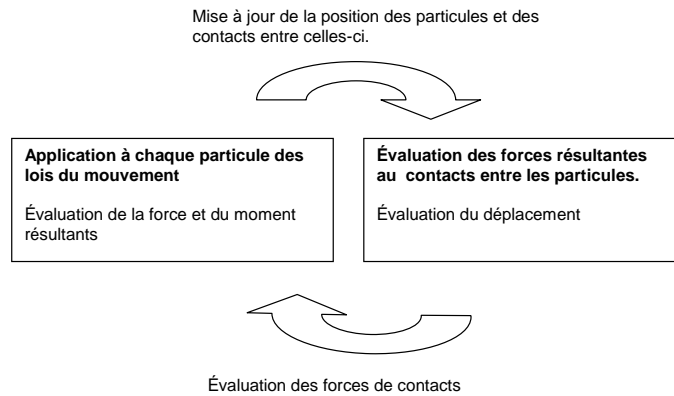


Figure 2.4. Principe du Particle Flow Code (PFC) (d'après Itasca, 2000).

2.4.2 Méthodologie utilisée pour les simulations

Les simulations pour les différentes géométries de cheminée ont été effectuées en suivant une procédure identique. Dans chaque cas, le déversement du matériel était simulé en générant des lots de particules dans une zone de génération située dans la partie supérieure de la cheminée et en le laissant tomber par gravité, tel qu'illustré à la Figure 2.5.

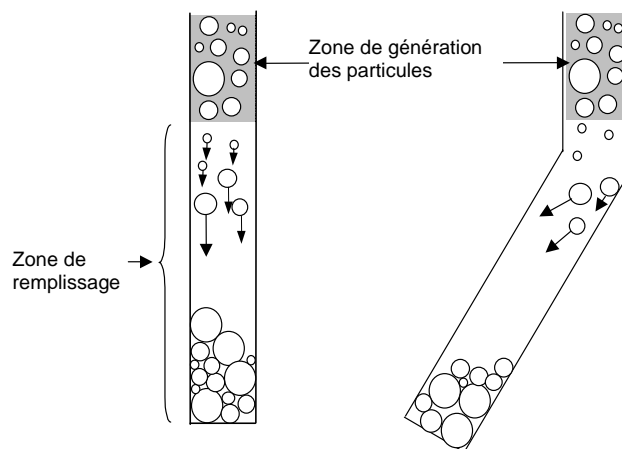


Figure 2.5. Procédure de remplissage des cheminées (illustré en 2D)

Le volume total pour chaque lot de particules variait entre 3.5 et 6 m³. Ces valeurs sont représentatives d'un déversement typique dans une cheminée puisque la majorité des mines répertoriées dans la base de données possède des chargeuses-navettes utilisant des godets de 5.5 m³. Les lots étaient générés successivement. Les particules d'un lot devaient toutes avoir terminé leur chute et atteint l'équilibre avant que le lot suivant ne soit généré. Ces procédures respectaient les conditions réelles rencontrées.

Les cheminées étaient remplies sur une hauteur de 20 m. En effet, la plupart des cheminées sont rarement gardées pleines, et par conséquent, une hauteur de 20 m est probablement représentative. Une fois la cheminée remplie, un nombre de cycles (time-steps) suffisant était effectué afin d'atteindre l'équilibre statique. Le mur du fond était alors éliminé afin de permettre au matériel de s'écouler hors de la cheminée. Deux conditions pouvaient résulter pour chacune des configurations: soit un écoulement libre pour la totalité du matériel ou un accrochage.

Les travaux de Leach et Van Hout (1995) sur l'application des éléments distincts en deux dimensions afin de simuler les accrochages dans les cheminées ont démontré la nécessité d'évaluer le phénomène sous un angle probabiliste.

Une telle approche probabiliste a été retenue dans le cadre du projet actuel. À cet effet, plusieurs simulations ont été effectuées pour chacun des ratios D/d évalués. Un total de 990 modélisations numériques a été réalisé dans le cas des cheminées verticales et 330 pour les cheminées inclinées. Dans les travaux antérieurs, 10 simulations étaient effectuées pour chacune des configurations dimension des cheminées / dimension maximale des particules (ratio D/d).

2.5 Évaluation de la stabilité des parois

Une méthodologie basée sur la détermination des contraintes induites, en considérant un comportement élastique du massif rocheux, a été proposée dans ce travail. Puisque dans le cas des cheminées aucune rupture ou fracturation causée par un excès de contrainte ne devrait être observée, étant donné l'action « récurrente » du matériel y transitant, la solution élastique fournit une solution adéquate et simple pour l'évaluation des contraintes induites. Dans la méthodologie proposée ici, l'état des contraintes induites est évalué pour une géométrie donnée de cheminée. Les états de contraintes sont ensuite comparés à un critère de rupture approprié. La Figure 2.6 présente de façon conceptuelle la méthodologie proposée. Les critères de rupture proposés sont basés sur les travaux de Wiles (2000).

La principale source d'erreur résultant de l'emploi d'une solution élastique réside surtout dans l'évaluation de l'étendue de la zone de rupture autour d'une excavation. Puisque dans le cas des cheminées, l'objectif visé est d'empêcher cette zone de rupture, l'erreur induite dans la détermination de celle-ci à l'aide d'une solution élastique n'a pas de conséquence.

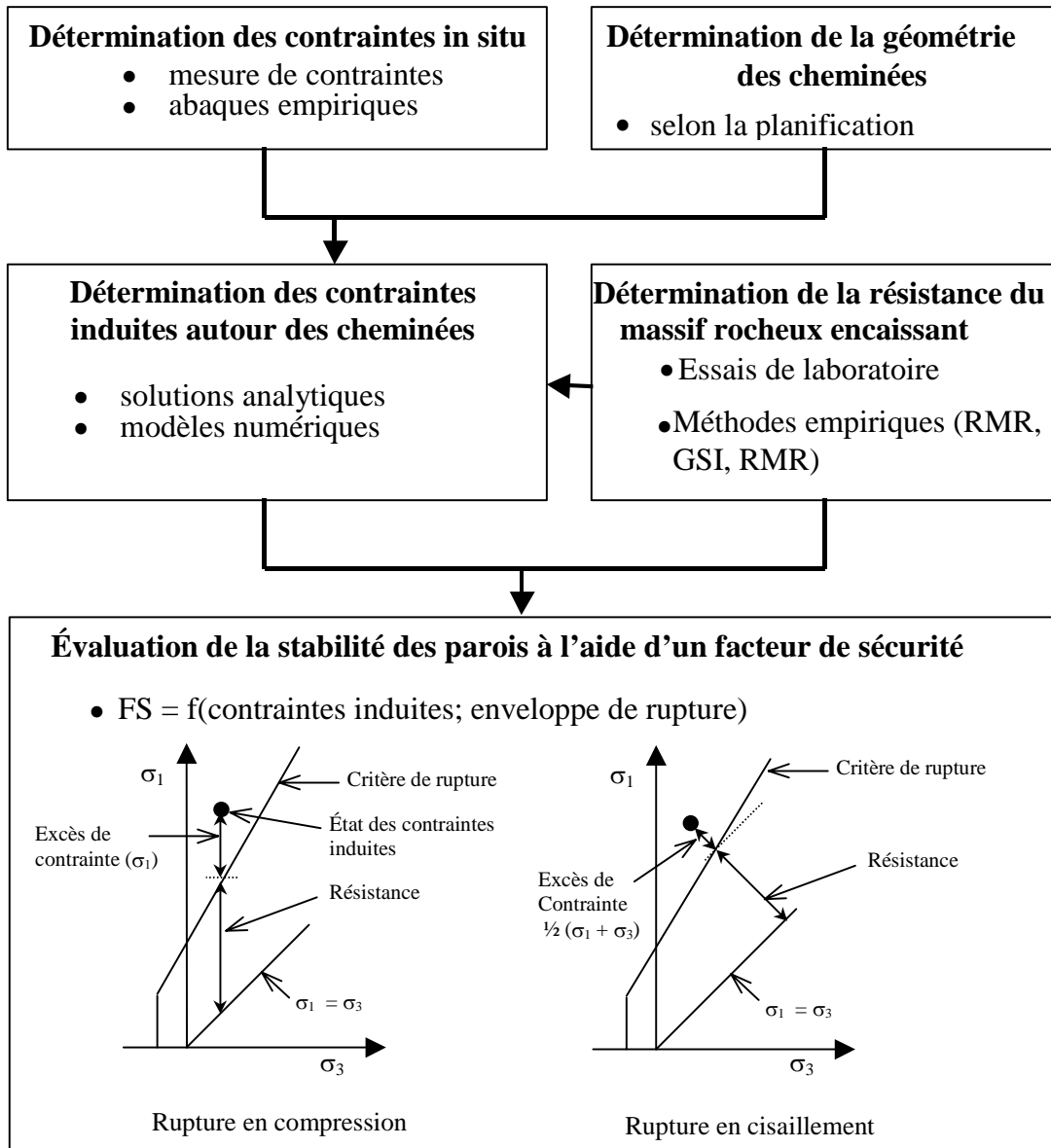


Figure 2.6. Méthodologie proposée pour l'évaluation de la stabilité des parois.

La Figure 2.7 présente les résultats de l'évaluation des contraintes induites à l'aide des trois méthodes dans le cas d'une excavation circulaire pour des champs de contraintes hydrostatiques et anisotropes. Il est possible de constater que dans le cas d'une cheminée circulaire, les résultats de l'évaluation des contraintes induites tangentielles ($\sigma_{\theta\theta}$) et radiales (σ_{rr}) sont similaires, indépendamment de la méthode utilisée.

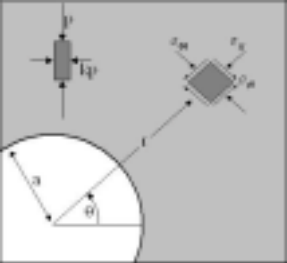
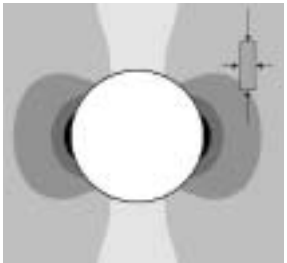

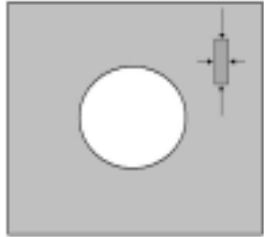
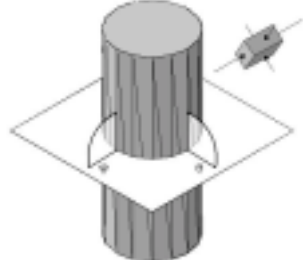
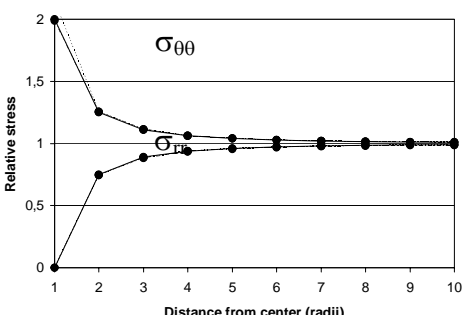
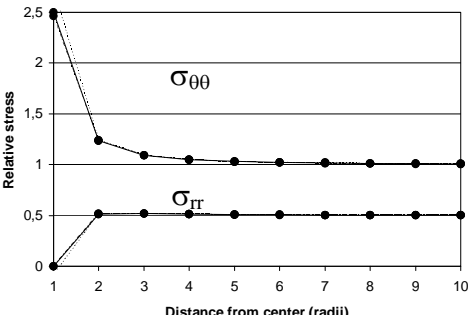
Méthode d'analyse	Kirsch (1898)	Examine2D	Map3D
			
Degrés de liberté	Solution analytique 2D	Modélisation numérique 2D	Modélisation numérique 3D
	 Les contraintes majeures et mineures doivent être parallèles au plan d'analyse. Celui-ci doit être perpendiculaire à l'axe de l'excavation.	 Les contraintes et l'orientation du plan d'analyse sont libres dans l'espace.	
Résultats	Contraintes hydrostatiques (k=1)		Contraintes anisotropes (k=0.5)
			

Figure 2.7. Résumé des méthodes élastiques d'évaluation des contraintes induites.

La solution analytique proposée par Kirsch (1898) permet une évaluation rapide des contraintes induites. Elle a toutefois été développée pour une excavation circulaire. Son application devrait donc être réservée pour les cheminées alésées. L'utilisation de modèles numériques 2D ou 3D utilisant les éléments finis de frontière est répandue dans l'industrie minière.

Une méthode empirique pour la localisation des cheminées est aussi proposée dans le Guide de conception des cheminées élaboré dans le cadre de ce projet. Cette méthode empirique a été élaborée en fonction de l'expérience rencontrée dans les mines souterraines québécoises. Les cas

d'études semblent démontrer que les problèmes d'agrandissement des cheminées sont minimisés lorsque le massif rocheux dans lequel celles-ci sont excavées possède un indice du NGI (Q) supérieur à une valeur de 5. Cette valeur de Q correspond à un massif de qualité passable selon Barton et Grimstad (1994).

3. RÉSULTATS

3.1 Élaboration d'une méthodologie de conception des cheminées à minerai et à stérile

L'analyse de la base de données ainsi que les travaux de caractérisation du matériel et les travaux de modélisation ont permis d'élaborer une méthodologie de conception des cheminées. La Figure 3.1 illustre de façon conceptuelle les étapes de la méthodologie proposée ici. Celle-ci est présentée en détail dans le guide de conception des cheminées élaboré dans le cadre de ce projet.

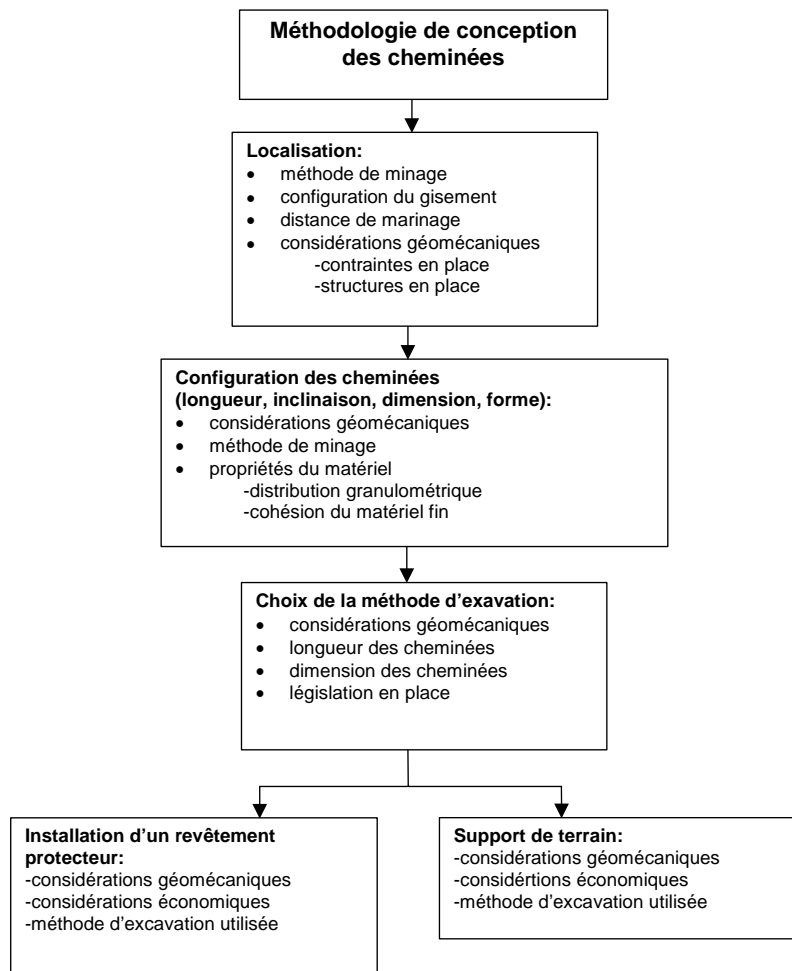


Figure 3.1. Méthodologie de conception des cheminées à minerai et à stérile.

3.2 Classification des méthodes de déblocage

Les différentes méthodes de déblocage utilisées dans les mines visitées ont été répertoriées lors des interviews avec les départements de formation et de production sous terre. Le nombre de méthodes utilisées est relativement restreint.

Les différentes méthodes de déblocages peuvent être répertoriées en trois groupes principaux: déblocage par ajout d'eau, déblocage à l'explosif et finalement, déblocage mécanique. Les trois groupes de méthodes font appel à différents mécanismes afin de déloger les accrochages formés dans les cheminées. Le Tableau 3.1 présente les méthodes de déblocage utilisées par les mines visitées.

Tableau 3.1. Méthodes de déblocage répertoriées dans les mines visitées.

Groupes	Méthodes de déblocage
Méthodes utilisant l'eau	<ul style="list-style-type: none">• Arrosage par un point plus haut que l'accrochage• Arrosage par un point plus bas que le blocage
Méthodes utilisant les explosifs	<ul style="list-style-type: none">• Forage rapproché et utilisation d'explosifs• Forage au diamant et utilisation d'explosifs• Utilisation de Spoutnik• Utilisation de perches et d'explosifs
Méthodes utilisant des moyens mécaniques	<ul style="list-style-type: none">• Système de soufflerie• Passage de chaînes

Les méthodes de déblocage basées sur l'utilisation d'eau sont, généralement, les premières méthodes à être utilisées lors d'un accrochage par la plupart des opérateurs miniers. Ce sont des méthodes rapides à utiliser et ne demandant que peu de main d'œuvre. Elles doivent toutefois être utilisées avec beaucoup de précaution étant donné qu'elles impliquent l'introduction d'eau dans le système de cheminées accroissant ainsi le risque de coulée de boue (spill). La totalité des mines visitées possèdent des règles très strictes quant à l'utilisation d'eau pour le déblocage des cheminées.

Les méthodes basées sur l'utilisation d'explosifs sont généralement les méthodes les plus efficaces dans le cas des enchevêtrements rocheux. Les charges explosives utilisées doivent être évaluées avec soin afin de limiter autant que possible les dommages causés par la déflagration.

Les méthodes mécaniques sont souvent des méthodes « maisons ». Ce ne sont pas des méthodes de déblocage en tant que telle mais plutôt des procédés afin de réduire l'accumulation de matériel fin, principalement dans les chutes et les coudes rencontrés parfois dans les cheminées.

L'information collectée a permis l'élaboration d'un guide illustrant les différentes méthodes de déblocages à l'attention des mineurs, tel que proposé dans le protocole soumis à l'IRSSST.

3.3 Classification des méthodes de réhabilitation des cheminées

La réhabilitation des cheminées est une activité rarement entreprise. Dans le cas où celle-ci est nécessaire, l'utilisation d'une méthode de travail sécuritaire est primordiale. Les méthodes identifiées dans le cadre de ce projet sont similaires d'une mine à l'autre. Il est possible de distinguer principalement deux différentes opérations de réhabilitation soit la réhabilitation des parois des cheminées et la réparation des infrastructures de contrôle du mouvement du matériel tels les chutes à minerai, chaînes de contrôle, etc.

La procédure suivie lors d'une réhabilitation générale des parois d'une section d'une cheminée est semblable pour l'ensemble des opérateurs miniers ayant effectué ces travaux. Les travaux de réhabilitation sont effectués du haut de la section vers le bas à l'aide d'une plate-forme mobile ou de plates-formes fixes construites à mesure de la progression des travaux.

Dans le cas des travaux de réparations des chutes, etc., une barrière protectrice est établie afin de protéger les travailleurs qui effectuent les travaux de réhabilitation des cheminées. Deux types de barrières sont rencontrés, soit les ballons protecteurs et les barrières solides.

4. DISCUSSION

Ce projet est à ce jour l'étude canadienne sur la conception des cheminées à minerai la plus complète à avoir été réalisée. L'importance des travaux présentés ici est reconnue par les nombreuses requêtes pour la dissémination de l'information tant au Canada qu'à l'étranger. L'extraordinaire collaboration des mines souterraines québécoises témoigne aussi de l'intérêt généré par ces travaux.

Grâce à la collaboration de l'industrie minière, une base de données sur les cheminées a été constituée à partir de 10 mines différentes. La base de données contient des informations sur :

- les méthodes d'excavation des cheminées à minerai,
- la géométrie des cheminées (diamètre, longueur, orientation),
- le support utilisé dans les cheminées,
- le type de revêtement protecteur utilisé,
- les problèmes opérationnels rencontrés,
- les solutions apportées à ces problèmes et les résultats obtenus.

Les données de terrain obtenues ont permis d'élaborer des règles directrices pour la localisation des cheminées dans les terrains compétents. L'écoulement du matériel a été analysé à l'aide de modélisations numériques. L'influence de la géométrie des cheminées (forme, dimension et inclinaison) et de la forme des particules sur l'occurrence de la formation d'accrochages a été étudiée en détail.

Les limites des travaux présentés ici résident principalement dans l'aspect empirique des règles de conception présentées ici, particulièrement en ce qui concerne la localisation des cheminées

dans des terrains jugés compétents. Par conséquent, bien qu'applicable dans son ensemble dans d'autres conditions que le contexte des mines québécoises, l'application de la méthodologie de conception présentée dans le Guide de conception des cheminées à minerai et à stérile ne devrait pas remplacer le sens commun de l'ingénieur.

Par exemple, les conditions de terrain rencontrées dans le camp minier de l'Abitibi font en sorte que les problèmes de terrains dus aux contraintes élevées sont relativement rares, ceci peut avoir introduit un biais dans la méthodologie proposée. Une réglementation, ou plus simplement des « traditions » différentes pourront influencer la sélection de la méthode d'excavation. Par exemple, en Ontario, l'excavation par alésage est plus répandue qu'au Québec. La sélection d'une méthode par alésage influencera la flexibilité des choix disponibles au niveau du support de terrain requis et de la géométrie des cheminées (inclinaisons, forme et dimension).

Une autre limite de la méthodologie présentée ici réside dans le fait qu'elle ne considère pas la conception des chutes et ne touche que la cheminée proprement dite. L'analyse des données recueillies dans les mines souterraines a clairement démontré que la conception actuelle des chutes s'est avérée être à l'origine de nombreux problèmes opérationnels au niveau de l'écoulement du matériel. L'ampleur des problèmes indique que la conception des chutes devrait être étudiée dans des travaux futurs.

5. CONCLUSIONS

Le rôle des cheminées est d'assurer un transfert non interrompu du matériel. Ceci implique une conception assurant un écoulement du matériel en tout temps de même que la stabilité des cheminées, et ce pour toute leur durée de vie requise.

L'expérience a toutefois montré que les cheminées sont fréquemment aux prises avec des problèmes d'écoulement de même qu'avec des problèmes de stabilité. Ces problèmes de stabilité sont causés, entre autre, par le régime de contraintes et par les structures en place dans le massif rocheux. Le matériel en mouvement participe aussi à la détérioration des cheminées, engendrant des impacts et une usure par abrasion aux parois. Ces problèmes opérationnels reliés à l'utilisation des cheminées ont un impact économique très important, pouvant aller jusqu'à l'arrêt des opérations.

Un guide de conception des cheminées a été élaboré. Les règles de conception proposées dans ce guide sont, en partie, basées sur l'analyse d'une base de données comportant 153 sections de cheminées à minerai provenant de 10 mines souterraines québécoises. Ce guide, à l'attention des ingénieurs miniers, fournit les outils de conception permettant :

- de localiser adéquatement les cheminées à minerai afin d'éviter les problèmes de stabilité structurale et les ruptures dues aux contraintes,
- de dimensionner adéquatement le diamètre et la géométrie des cheminées à minerai afin de réduire ou d'éliminer les accrochages,

- de concevoir les cheminées de manière à diminuer les problèmes d'usure et d'impacts dus au passage du matériel,
- d'évaluer le type de support requis,
- d'élaborer une stratégie de monitoring de l'état des cheminées.

Le dimensionnement adéquat des cheminées est primordial afin d'éviter l'occurrence d'accrochages. Un outil empirique de dimensionnement des cheminées afin de prévenir les enchevêtrements rocheux a été élaboré en fonction des données de terrain. Cet outil a été validé à l'aide de modélisations numériques.

Un guide destiné aux mineurs suggère aussi une liste de méthodes de travail sécuritaires reliées à la localisation des accrochages dans les cheminées à minerai et aux activités de déblocage subséquentes.

5.1 Applicabilité des résultats

Le guide de conception des cheminées à minerai et à stérile proposé ici est applicable de façon générale à l'ensemble des mines. Par contre, l'applicabilité des règles empiriques présentées ici devrait être effectuée avec certaines réserves dans le cas des mines à grandes profondeurs. En effet, les mines répertoriées dans la base de données se caractérisent par l'absence de problèmes critiques dus aux contraintes élevées, et par conséquent, les règles empiriques relatives à la localisation des cheminées dans des massifs compétents peuvent donc être biaisées. Les résultats sur le soutènement et sur la sélection des méthodes d'excavations peuvent être appliqués au percement des cheminées de ventilation.

Le guide des méthodes de déblocage destiné aux mineurs se veut un outil complémentaire aux procédures en vigueur dans les différentes opérations minières.

5.2 Retombées du projet

L'industrie des mines souterraines bénéficie de nouveaux outils de conception des cheminées à minerai où « l'intuition » ne sera plus de mise. Une conception adéquate entraînera une utilisation moins problématique des cheminées et, par conséquent, pourra contribuer à augmenter la sécurité des travailleurs affectés à leur opération. La construction de cheminées à minerai moins susceptibles aux accrochages sera donc rendue possible. Ces cheminées seront aussi conçues afin d'empêcher ou de retarder l'apparition de la dégradation des parois. L'opération de ces cheminées sera plus sécuritaire pour les travailleurs puisque les accrochages et les travaux de réhabilitation seront moins fréquents.

Le guide des méthodes de déblocage destiné aux opérateurs miniers fera en sorte qu'ils auront une revue des différentes méthodes de travail sécuritaire reliées aux opérations de déblocage. La sélection de la meilleure méthode de déblocage en fonction des circonstances rencontrées devrait leur permettre d'évoluer dans un milieu de travail plus sécuritaire.

6. ÉCHANGES ET DISSÉMINATION DE L'INFORMATION

6.1 Présentations dans le cadre du projet actuel

Les présentations et réunions d'informations suivantes ont été effectuées dans le cadre de ce projet.

- Participation de M. Hadjigeorgiou en tant que conférencier à un atelier de travail sur les cheminées à minerai organisé par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) en décembre 2003.
- Présentation d'un article au congrès international de l'ISRM *Technology Roadmap for Rocks Mechanics* organisée en Afrique du Sud en septembre 2003.
- Présentation d'un article au 3rd *International Seminar on Surface Support Liners* organisée à Québec en mai 2003
- Présentation de la deuxième phase du projet dans un article lors du 18^e Colloque en Contrôle de Terrain organisé à Val d'Or en mars 2003 par l'Association Minière du Québec.
- Présentation de la première phase du projet dans un article lors du 17^e Colloque en Contrôle de Terrain organisé à Val d'Or en mars 2002 par l'Association Minière du Québec.
- Présentation des résultats de la première phase du projet dans un article lors du forum du congrès annuel de l'Institut Canadien des mines organisé à Vancouver en Avril 2002.
- Diverses réunions d'information avec des représentants de L'Association Minière du Québec durant les années 2001, 2002 et 2003.
- Échanges d'informations techniques et discussions du projet en cours avec le personnel des 10 mines visitées.

6.2 Collaboration en cours

Une collaboration étroite a été instituée avec le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) avec la permission de l'IRSST. Les résultats de nos travaux en cours ont été transmis à l'équipe du Dr. Beus au laboratoire de Spokane dans l'État de Washington. Ceux-ci nous ont aussi transmis leurs travaux en cours afin de les critiquer. Ces travaux portent sur la modélisation numérique des impacts générés sur les portes de contrôle et les accrochages dans les cheminées des mines Stillwater et Lucky Friday.

Des échanges d'informations sont en cours avec les personnes suivantes: T.R. Stacey de l'Université de Witwatersrand en Afrique du Sud, T. Hagan de Miningtek en Afrique du Sud et Dr. Hustrulid de l'Université de l'Utah aux États-Unis.

7. RÉFÉRENCES

Aytaman V. Causes of Hanging in Ore Chutes and its Solution, *Canadian Mining Journal* **81**, 77-81 (1960).

Barton N. & Grimstad E. The Q-System Following Twenty Years of Application in NMT Support Selection. *Felsbau* Vol 16, no.6 : 48-436 (1994).

Beauchamp L. Communication personnelle (1999).

Brummer R. K. Design of Orepasses: Methods for Determining the Useful Life of Ore-passes Based on Previous Experience and Case Studies. Report to CAMIRO Mining Division, p. 55. Richard Brummer and Associates (1998).

Ferguson G. Ore Pass Design Guidelines. Report for the Mining Research Directorate, p. 188. Bharti Engineering and Ass. (1991).

Goodwill D.J., Craig D.A. & Cabrejos F. Ore Pass Design for Reliable Flow, *Bulk Solids Handling*, Vol 19, no.1: 13-21 (1999).

Hagan T O, Acheampong E, 1999. Current Design, Support and Maintenance of Rockpasses and Assessment of Practices Applicable at Depth, *Proceedings of the 2nd Southern African Rock Engineering Symposium* (Ed T O Hagan), pp 62-79 (International Society of Rock Mechanics, South Africa).

Hambley D.F., Pariseau W.G. & Singh M.M. Guidelines for Open-Pit ore pass design. Contract Report, US Bureau of Mines, Contract no J0205041 Engineers International Inc. (1983).

Hambley D.F. Design of Ore Pass Systems for Underground Mines. *CIM Bulletin* **897**, 25-30 (1987).

- Itasca, Particle Flow Code User Manual (2000).
- Jenike A.W. Gravity Flow of Bulk Solids Bulletin No. 108. The University of Utah (1961).
- Jenike A.W. & Johanson J.R. Tunnel Reclaim from Ore Stockpiles. http://www.jenike.com/pages/education/cases/stockpile_study/stockpiles.html. (2003)
- Kvapil R. Gravity Flow of Granular Material in Hoppers and Bins in mines – II Coarse Material. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* **2**, 277-304 (1965).
- Lapointe P. Communication personelle (1999).
- Larson M. K., Iverson S.R., Stewart B.M. & Walker K. Preliminary Assessment of Particle Flow Code as a Tool to Assess Ore Pass Safety. *Int. J. of Rock Mechanics & Min. Science* **35 : 4/5**, Paper 092, (1998).
- Leach A.R & G. Van Hout. Examination of Ore Pass Hang-Ups at Premier Diamond Mine, Itasca Africa (Pty), Ormonde, South Africa, Ref. PO5/R1/95, 46 pp. (1995).
- Lessard J.F. & Hadjigeorgiou J. Ore Pass Systems in Quebec Underground Mines. *12th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Kargoorlie, (2003)
- Maerz N.H. & Zhou W. Calibration of Optical Digital Fragmentation Measuring Systems. *Fragblast 1999*. Johannesburg, 125-130 (1999).
- Peele R. Mining Engineer Handbook. 3rd ed. Vol 1, John Wiley and Sons, New York (1947).
- Stacey T.R. & Swart A.H. Investigation into Drawpoints, Tips Orepasses and Chutes Vol. 1. Report to the Safety in Mines Research Advisory Committee, p. 112. Steffen, Robertson and Kirsten (1997).
- Wiles T., Map3D User Manual Version 36. 331pp (2000).
- Wipware, Wipfrag for Windows Version 1.1 Manuel d'utilisation. (2001).