

Institut de Recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

PhareSST

Guides

Guides et fiches

2004

Guide de conception des cheminées à minerais et à stérile

Jean-François Lessard

John Hadjigeorgiou

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

Citation recommandée

Lessard, J. F. et Hadjigeorgiou, J. (2004). *Guide de conception des cheminées à minerais et à stérile* (Guide n° RG1-380). IRSST.

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

Guide de conception des cheminées à minerai et à stérile

Jean-François Lessard
John Hadjigeorgiou

ÉTUDES ET RECHERCHES

RG1-380

GUIDE





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

Guide de conception des cheminées à minerai et à stérile

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

ÉTUDES ET
RECHERCHES

GUIDE

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.

1. INTRODUCTION

L'installation d'un système de manutention du matériel dans une mine souterraine implique d'importantes dépenses en capital. Ceux-ci incluent les coûts d'excavation, les coûts liés à l'installation des infrastructures et ceux reliés à l'achat et à la maintenance de l'équipement requis. Étant donné l'ampleur des ceux-ci, il est primordial de maximiser la vie utile du système de manutention afin de les déprécier sur le plus grand tonnage possible. Cette exigence, de même que la nature intégrée et linéaire des systèmes de manutention limite la flexibilité des opérations minières à effectuer des changements après l'installation et la mise en service de ceux-ci. Il est donc primordial de maximiser l'ingénierie lors de la conception de ces systèmes, et ce pour chacun des éléments constitutifs. Les cheminées à minerai et à stérile sont un des éléments clés des systèmes de manutention. Conséquemment, elles devraient recevoir une attention particulière.

Le transport du minerai vertical du minerai entre les niveaux supérieurs de la mine aux niveaux inférieurs et du stérile dans la plupart des mines souterraines est généralement effectué par gravité à l'aide d'un système de cheminées à minerai. Ces cheminées sont illustrées à la Figure 1.1.

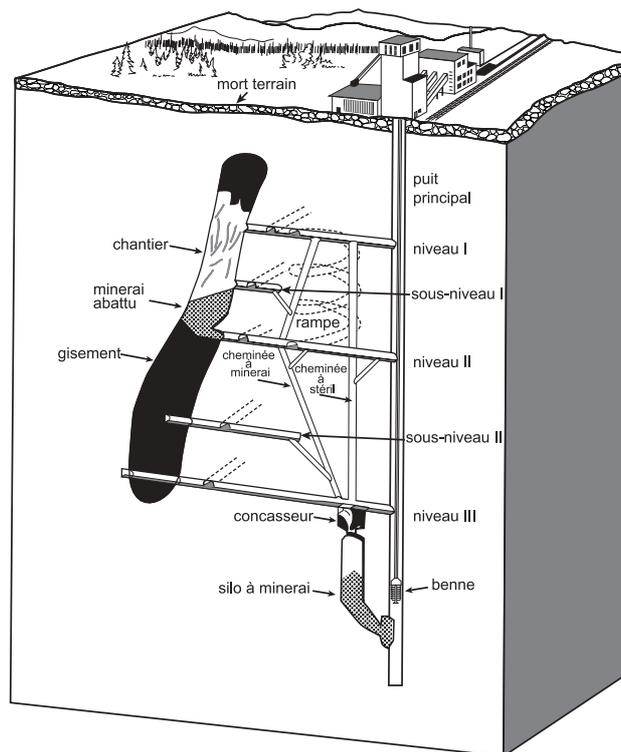


Figure 1.1. Système de manutention du minerai dans une mine souterraine.

Une conception adéquate des cheminées est primordiale afin de permettre une opération sans problème et ainsi, améliorer la sécurité du personnel tout en réduisant les coûts d'opérations. Une conception sera jugée adéquate si les performances actuelles des cheminées atteignent ou surpassent les performances espérées pour le tonnage manipulé, pour la durée de vie et pour l'absence de problèmes opérationnels lors de leur utilisation.

Ce guide se veut un outil afin d'assister l'ingénieur dans la conception des cheminées à minerai et à stérile. La marche à suivre pour une conception adéquate peut être regroupée en 2 étapes principales soit ;

- l'élaboration des spécifications requises
- la conception des cheminées en fonction des spécifications.

Ce guide met l'emphase sur l'étape de conception. Une partie des règles de conception présentées ici ont été élaborées empiriquement à partir de l'analyse des résultats d'une campagne de collecte de données sur la conception des cheminées effectuées dans 10 mines souterraines du Québec. La Figure 1.2 illustre de façon conceptuelle les étapes de la méthodologie proposée ici.

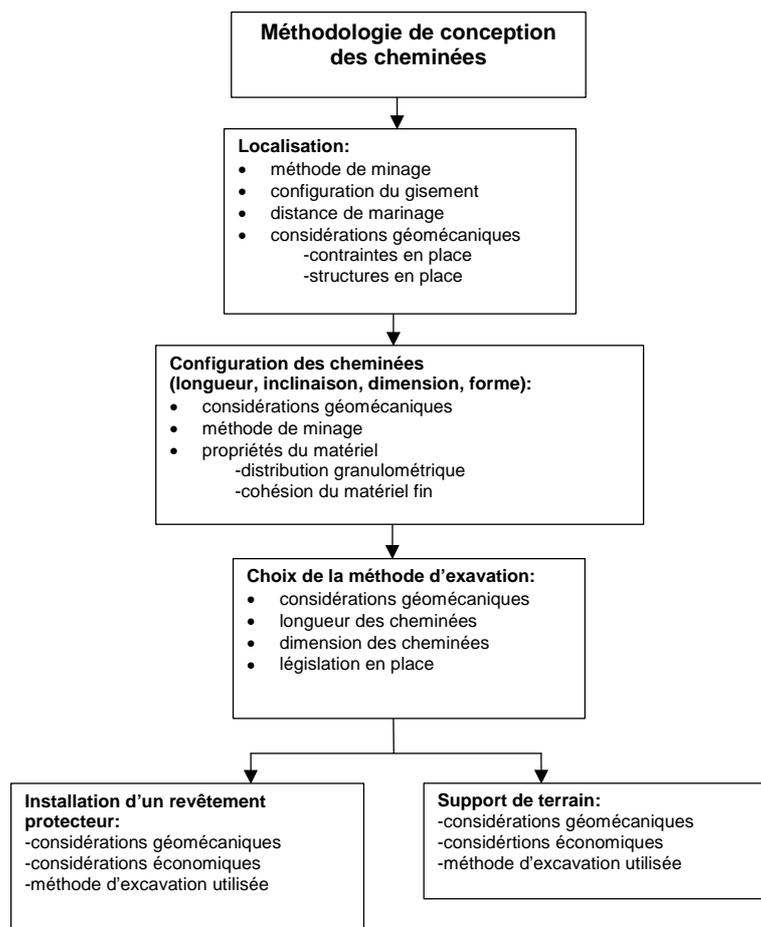


Figure 1.2. Méthodologie de conception des cheminées.

2. SPÉCIFICATIONS REQUISES

Une attention particulière doit être portée, dès les études de faisabilité du projet minier, afin d'élaborer une liste de spécifications réalistes auxquelles le système de manutention du matériel devra répondre. La géométrie du gisement et la méthode de minage influenceront principalement la configuration générale du système de manutention du matériel. Les spécifications générales à établir sont :

- l'utilisation de système commun ou séparé pour le transport du stérile et du minerai,
- l'utilisation d'une cheminée à minerai unique ou d'un système multiple de cheminées à minerai,
- le tonnage total à être déversé par cheminée,
- la durée de vie des cheminées requise,
- la localisation des cheminées en fonction des infrastructures (exemple : cheminées près du puits ou près des chantiers).

Des spécifications propres à l'opération des cheminées doivent aussi être élaborées. Celles-ci sont :

- la gestion du niveau de matériel dans les cheminées (exemple : cheminées gardées pleines ou vides),
- la capacité de contrôler la fragmentation du matériel déversé (exemple : utilisation de grizzly),
- la capacité de contrôler du niveau de matériel dans les cheminées (exemple : utilisation de chutes),
- la mise en place d'un programme de monitoring (exemple : monitoring du niveau de minerai dans les cheminées, monitoring de l'état des parois des cheminées).

3. LOCALISATION DES CHEMINÉES :

La localisation des cheminées doit tenir compte de plusieurs facteurs. Elle est habituellement un compromis entre les aspects opérationnels et le positionnement dans un terrain adéquat. En premier lieu, plusieurs zones potentielles devraient être identifiées pour la localisation des cheminées en fonction des aspects opérationnels. La sélection de l'emplacement final des

cheminées devrait ensuite être effectuée en fonction de la qualité du massif rocheux. L'orientation des cheminées devrait tenir compte, autant que possible, de la fracturation du massif rocheux et des contraintes en place.

Le positionnement des systèmes de cheminées, des stations du concasseur ou du marteau peuvent être près du puits ou près des chantiers, tel que présenté à la Figure 3.1a. Dans le cas où le système de manutention du matériel est situé près du puits, la distance entre le concasseur et la station de chargement du puits sera minimisée. De plus le système de cheminées sera localisé loin des activités de minage, donc moins affecté par la modification du champ de contrainte aux abords des chantiers. Les désavantages associés à cette configuration sont; une plus grande distance de marinage requise et une augmentation du risque de compromettre l'intégrité structurale du puits dans le cas d'apparition du problème de dégradation des parois des cheminées.

Les systèmes de manutention du minerai peuvent aussi être situés à distance du puits afin de minimiser la distance de marinage requise, Figure 3.1b. Cette configuration est perçue comme étant plus sécuritaire pour le puits dans l'éventualité de problèmes de dégradation des parois dans les cheminées. Un des désavantages associé à cette configuration est l'allongement de la distance entre la station de concassage et la station de chargement au puits. Un convoyeur est habituellement utilisé pour le transport du matériel, augmentant ainsi le risque de bris dans la chaîne, déjà linéaire, du système de manutention du matériel. Les convoyeurs entraînent généralement une augmentation des coûts d'opération étant donné leur besoin important en maintenance. Un autre désavantage est le rapprochement des cheminées des activités de minage et, par conséquent, de leur exposition aux changements dans le niveau des contraintes induites à proximité des chantiers. Par contre, en cas de dégradation sévère des cheminées, cette configuration offre une plus grande versatilité pour excaver des cheminées de remplacement.

Une combinaison des deux configurations précédentes peut-être utilisée dans le cas d'un gisement très étendu, Figure 3.1c. Plusieurs cheminées peuvent être positionnées à travers le gisement de façon à réduire les distances de marinage. Ces cheminées se terminent à un niveau dédié au marinage. Le matériel est ensuite acheminé à un silo ou à une cheminée principale puis au concasseur. Ce système offre l'avantage de minimiser le tonnage circulant dans chacune des cheminées, réduisant ainsi l'usure. En cas de dégradation sévère, il est relativement facile de positionner une cheminée de remplacement. Par contre, le temps dédié aux opérations de déblocages peut être considérable étant donné le nombre plus élevé de cheminées. Cette configuration oblige aussi la construction et la maintenance d'une galerie de marinage.

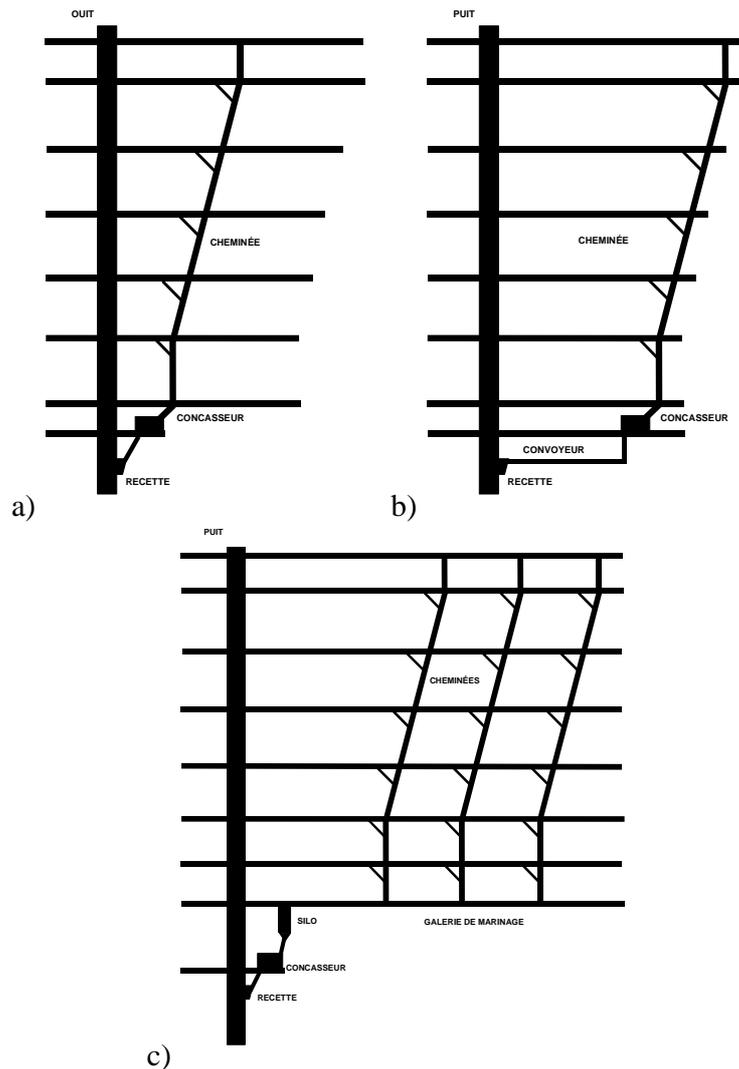


Figure 3.1. Arrangement typique des systèmes de cheminées a) loïn du puits, b) près du puits, c) utilisation d'une galerie de marinage.

3.1 Localisation empirique des cheminées en fonction de la qualité du massif rocheux :

Il est primordial afin d'éviter les problèmes de dégradation de localiser les cheminées dans le meilleur terrain possible. L'expérience des mines souterraines québécoises semble 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) supérieure à une valeur de 5. Ceci correspond à un roc de qualité moyenne selon Barton et Grimstad (1994). Cette version plus récente du NGI est mieux adaptée aux mines souterraines en ce qui concerne l'influence des contraintes sur la valeur de l'index Q (par la prise en compte, par exemple, des événements sismiques).

Dans le cas où il n'est pas possible de localiser les cheminées dans un tel massif ($Q > 5$), une analyse économique devrait être réalisée afin de déterminer s'il est préférable de planifier un revêtement protecteur (dans le cas où la longévité requise de la cheminée le requiert) ou s'il est préférable de déplacer la cheminée en augmentant les distances de marinage.

3.2 Positionnement des cheminées en fonction des structures en place

Dans les massifs stratifiés, l'orientation des cheminées par rapport à la stratification est très importante afin de minimiser les ruptures structurales observées dans les parois de la cheminée. Il est souhaitable d'orienter les cheminées de façon à intersecter le plus perpendiculairement possible l'orientation moyenne de la stratification tel qu'illustré à la Figure 3.2

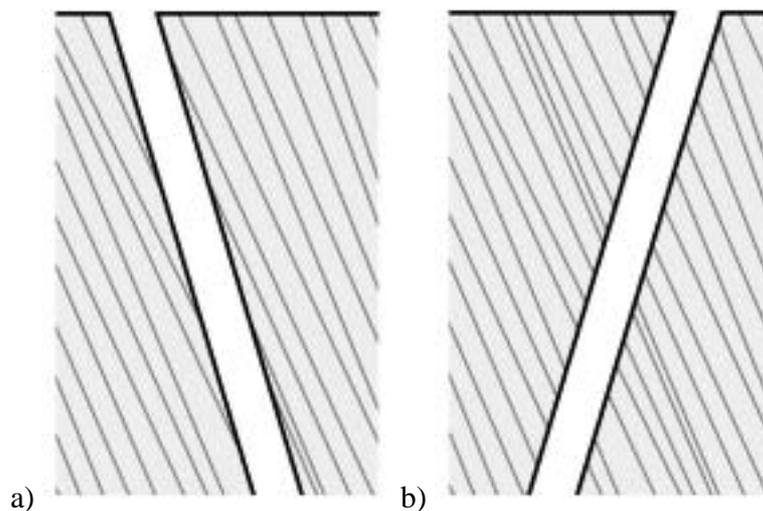


Figure 3.2. Orientation des cheminées par rapport à la stratification : a) configuration défavorable, b) configuration favorable.

Dans le cas des massifs rocheux ne démontrant pas de stratification importante, une analyse d'équilibre limite devrait être réalisée afin d'évaluer l'influence de l'orientation sur le volume des dièdres rocheux formés aux parois. L'utilisation d'un logiciel tel Unwedge, Rocscience (2002), facilite grandement l'analyse de stabilité des dièdres.

3.3 Localisation des cheminées en fonction des contraintes

Une méthodologie basée sur la détermination des contraintes induites considérant un comportement élastique du massif rocheux est proposée ici. Puisque dans le cas des cheminées aucune rupture ou fracturation causée par un excès de contrainte ne devrait être tolérée, étant donné l'action « récurrente » du matériel y transitant, la solution élastique fournit une solution

adéquate et simple à l'évaluation des contraintes induites. Dans la méthodologie proposée ici, l'état des contraintes induites est évalué pour une géométrie de cheminée donnée. Les états de contraintes sont ensuite comparés à un critère de rupture approprié. La Figure 3.3 présente de façon conceptuelle la méthodologie proposée. Les critères de rupture proposés sont basés sur les travaux de Wiles (2000).

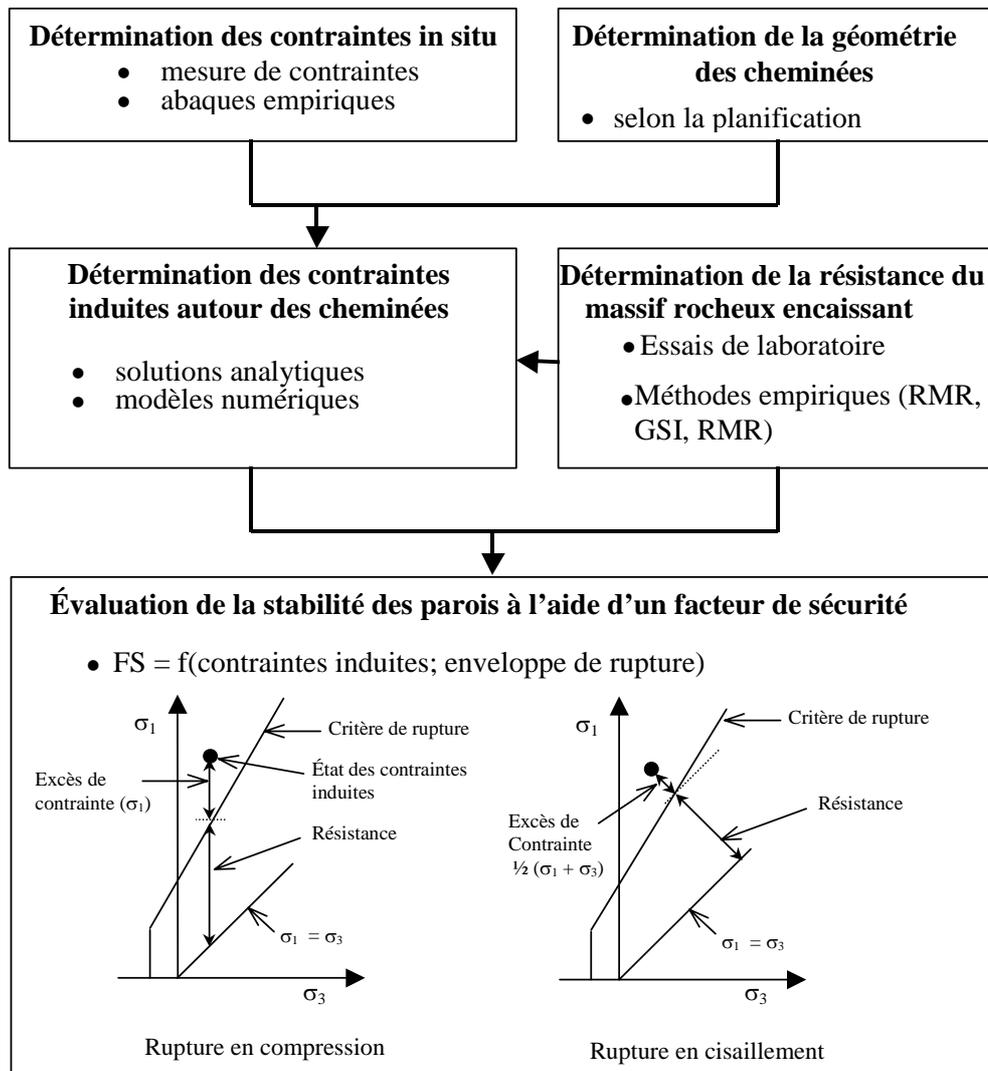


Figure 3.3. Méthodologie proposée pour l'évaluation de l'effet des contraintes sur la dégradation des parois des cheminées.

La Figure 3.4 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.

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 maintenant répandue dans l'industrie minière. Examine 2D, Examine 3D et Map3D sont parmi les logiciels les plus utilisés à cette fin. Une fois les contraintes induites évaluées, la stabilité des parois est finalement évaluée en comparant le niveau des contraintes à la résistance du massif rocheux selon un critère de rupture approprié aux conditions du massif rocheux rencontrées.

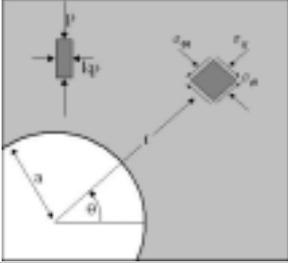
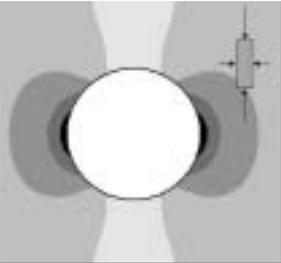
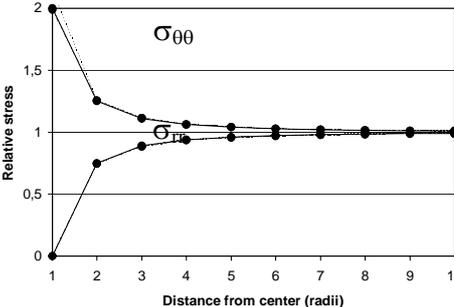
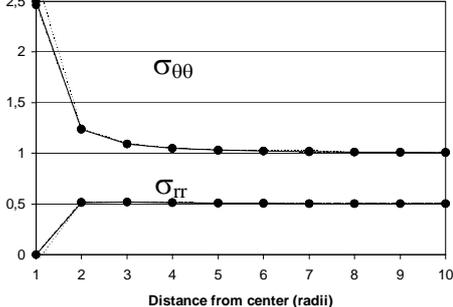
Méthode d'analyse	Kirsch (1898)	Examine2D	Map3D
Degrés de liberté	Solution analytique 2D 	Modélisation numérique 2D 	Modélisation numérique 3D 
Résultats	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="256 1384 742 1780"> <p>Contraintes hydrostatiques (k=1)</p>  </div> <div data-bbox="758 1384 1243 1780"> <p>Contraintes anisotropes (k=0.5)</p>  </div> </div> <p>— solution de Kirsch Examine2D - - - - - Map3D</p>		

Figure 3.4. Résumé des méthodes élastiques d'évaluation des contraintes induites.

3.3.1 Orientation préférentielle des cheminées

Lorsque le régime de contrainte en place est élevé, il peut être impossible d'éviter les ruptures dues aux contraintes. Dans ce cas, il est recommandé d'orienter la cheminée de façon à ce que les dommages soient concentrés dans les murs de la cheminée et non dans les épontes, Figure 3.5. Cette configuration réduit la possibilité que le matériel circulant dans la cheminée n'endommage davantage les zones de ruptures.

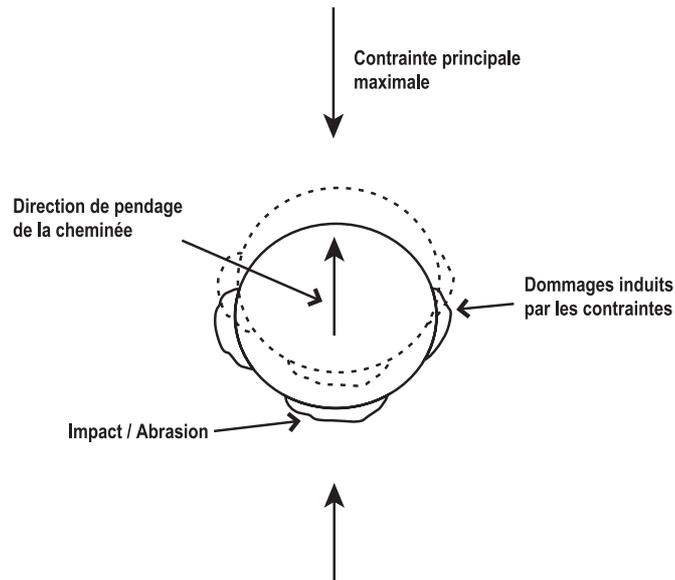


Figure 3.5. Orientation préférentielle des cheminées en fonction de l'orientation des contraintes, d'après Brummer (1998).

4. CONCEPTION DES CHEMINÉES

Une cheminée est en réalité la combinaison d'un ensemble d'éléments tels qu'illustrés la Figure 4.1. Il est courant de voir plusieurs cheminées juxtaposées se déversant l'une dans l'autre formant ainsi un système en série.

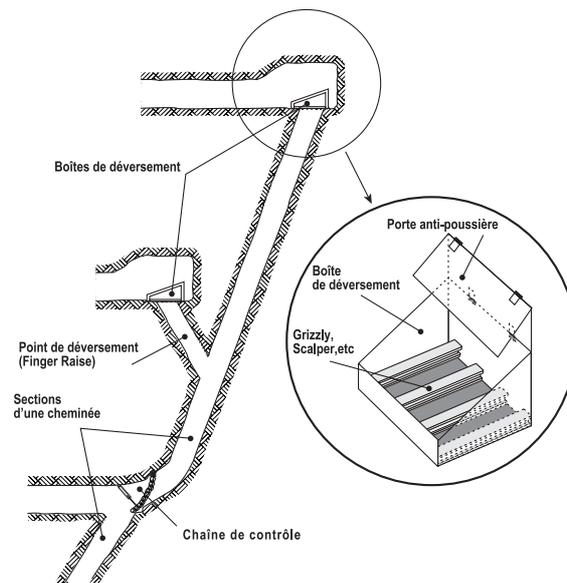


Figure 4.1. Nomenclature des composantes d'une cheminée.

4.1 Problèmes opérationnels rencontrés

Les interviews réalisées avec le personnel des mines souterraines visitées ont permis d'identifier les problèmes opérationnels rencontrés par celles-ci. Deux principaux types de problèmes sont retrouvés dans la plupart des opérations; la dégradation des parois des cheminées, causant un agrandissement du volume des cheminées et les problèmes d'écoulement du matériel dans les cheminées.

4.1.1 Dégradation des parois

La plupart des cheminées des mines visitées présentent, à différents degrés, une dégradation des parois. Seulement 38% des sections dans les mines du Québec ne démontrent pas de signe évident de dégradation, tandis que 52% des cheminées ont vu leur volume initial doubler ou plus. Cette augmentation de volume a entraîné l'abandon de 13% des cheminées.

4.1.2 Problème d'écoulement du matériel dans les cheminées

Les principaux problèmes d'écoulement du matériel dans les cheminées sont les accrochages et les coulées de boues. Un accrochage (hang-up) est défini comme une obstruction empêchant l'écoulement le long de la cheminée. Dans le cas où le matériel transporté est constitué de fragments grossiers, les accrochages seront principalement causés par un enchevêtrement

rocheux, Figure 4.2a. Si le matériel contient une proportion supérieure à 10% de matériel fin (< 4 mm), les accrochages pourront résulter d'un arche cohésive, Figure 4.2b.

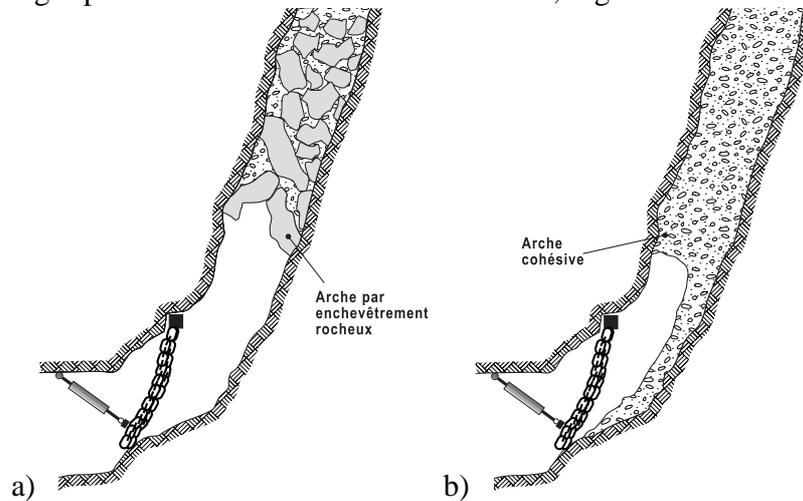


Figure 4.2. Accrochages par: a) enchevêtrement rocheux b) arche cohésive.

Le deuxième type de problème relié à l'écoulement du matériel dans les cheminées est le phénomène des coulées de boue (« mud-rush », « spill »). Ce type de problème est beaucoup plus rare que les accrochages, par contre, ses conséquences sont beaucoup plus sérieuses car elles peuvent se produire soudainement, sans signe annonciateur. Une coulée de boue est un déplacement soudain d'un matériel saturé hors de la cheminée. L'utilisation minimale d'eau dans les cheminées et un soutirage fréquent du matériel dans les cheminées, afin de garder le matériel en mouvement le plus possible et ainsi minimiser la compaction, sont les meilleures stratégies pour prévenir les coulées de boue. Les accrochages par arche cohésive sont donc particulièrement préoccupants car ils facilitent l'accumulation d'eau dans les cheminées si le matériel est suffisamment compacté pour empêcher le drainage par percolation. Cette accumulation d'eau, si elle n'est pas détectée, est particulièrement dangereuse lors des opérations de déblocage.

4.2 Évaluation des propriétés du matériel.

Une conception adéquate des cheminées implique la caractérisation des propriétés du matériel y circulant. Les propriétés suivantes sont particulièrement importantes :

Type de matériel transporté et poids volumiques:

Une analyse de la base de données a indiqué une forte corrélation entre le poids volumique du matériel transporté et le degré de dégradation des parois. Selon Hambley et al. (1983), les impacts générés sur les murs et au point d'arrivée du minerai sont directement proportionnels aux vitesses atteintes par le matériel et au poids volumique de celui-ci. Le type de matériel transporté peut influencer le type de blocages et d'accrochages rencontrés. Par exemple

l'oxydation d'un matériel riche en sulfures peut faciliter l'occurrence d'enchevêtrements rocheux. Un tel matériel devra être maintenu en mouvement le plus régulièrement possible.

Distribution granulométrique du matériel:

Toutes les règles de dimensionnement des cheminées relient la dimension requise de l'excavation à la dimension des blocs rocheux. La connaissance de la distribution granulométrique permet l'évaluation de la dimension maximale des blocs rocheux. Elle permet aussi d'évaluer la proportion de fines dans le matériel. Les fines sont considérées par Jenike (2003) comme les particules < 4 mm. Une proportion de fines supérieure à 10% en poids pourra entraîner un comportement cohésif du matériel. Plusieurs logiciels d'analyse d'images sont disponibles commercialement afin d'évaluer la distribution granulométrique des sautages.

Cohésion de la fraction fine du matériel transporté :

La cohésion des fines influence la possibilité d'occurrence d'arches cohésive. Les outils de dimensionnement des cheminées proposés ici requièrent l'évaluation de la cohésion du matériel fin a été réalisée. Celle-ci peut être obtenue à l'aide d'essais de cisaillement directs. Il est important de réaliser les essais sur un matériel de teneur en eau similaire à celle prévue dans les conditions de terrains étant donné l'influence importante de la teneur en eau sur le cisaillement. Les teneurs en eau observées sur le terrain varient habituellement entre 2% et 8%.

4.3 Formes des cheminées :

La forme circulaire est toutefois préférable au point de vue de la stabilité des parois lorsque le régime de contrainte est élevé. Par contre, la majorité (69%) des cheminées répertoriées dans les mines souterraines québécoises est de forme carrée. Les commentaires recueillis indiquent généralement que la forme carrée facilite l'écoulement du matériel. Des simulations numériques modélisant l'écoulement du matériel ont montré que le nombre d'accrochages était inférieur de 6% dans les cheminées carrées par rapport aux cheminées circulaires.

4.4 Dimension des cheminées :

Le dimensionnement adéquat des cheminées est le paramètre critique afin de prévenir les accrochages par enchevêtrement rocheux et les arches cohésives.

4.4.1 Prévention des enchevêtrements rocheux

Un mauvais ratio entre la dimension des cheminées et la dimension maximum des fragments rocheux est la cause principale des accrochages par enchevêtrement rocheux. Le dimensionnement des cheminées est donc réalisé en fixant une dimension minimale requise (D),

en fonction de la taille maximale des blocs rocheux déversés dans la cheminée (d). Les définitions de D pour des cheminées circulaire, carrée et rectangulaire sont données à la Figure 4.3. La taille maximale des blocs rocheux peut être définie soit en fonction du plus gros bloc qu'il est possible de transporter avec l'équipement de manutention, soit en fonction d'une analyse de la fragmentation résultante des sautages. Une estimation visuelle de la taille des blocs est possible mais n'est pas recommandée. Si l'utilisation d'un grizzly ou d'un scalpeur est planifiée, il est possible de déterminer la taille maximale des fragments rocheux en fonction de l'ouverture de celui-ci.

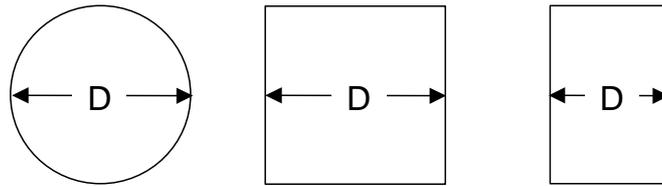


Figure 4.3. Définition de D pour des cheminées circulaires, carrées et rectangulaire.

L'influence de la forme des particules (sphériques ou cubiques) sur la formation d'enchevêtrement rocheux a été évaluée. Un modèle numérique par éléments distincts a été utilisé afin d'évaluer les ratios D/d requis pour des cheminées verticales de forme circulaire, Figure 4.4, ou carrée, Figure 4.5. Les ratios D/d requis pour des cheminées inclinées de forme carrée sont présentés à la Figure 4.6. Chaque abaque présente deux ratios D/d différents requis afin d'obtenir un écoulement libre, considérant un matériel peu anguleux (de forme sphérique) et plus anguleux (de forme cubique).

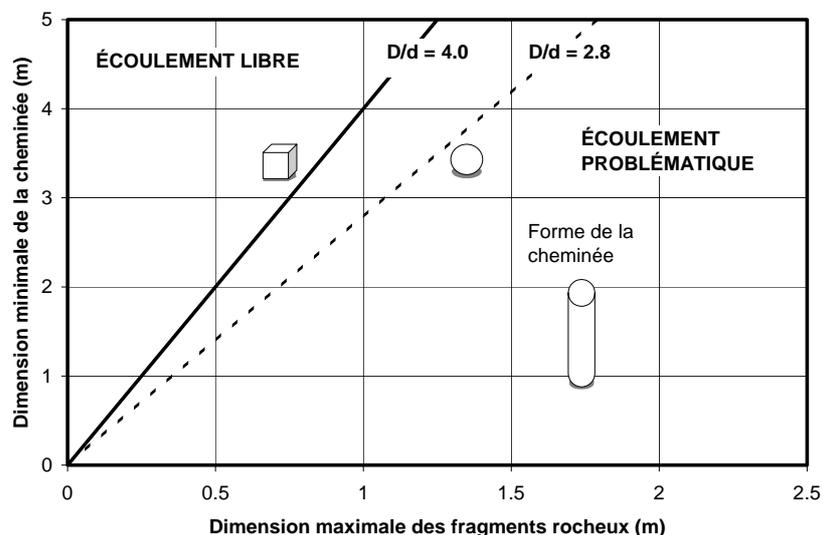


Figure 4.4. Influence de la forme des fragments rocheux sur le ratio D/d requis pour un écoulement libre, cas des cheminées verticales circulaire, d'après Lessard et Hadjigeorgiou (2003).

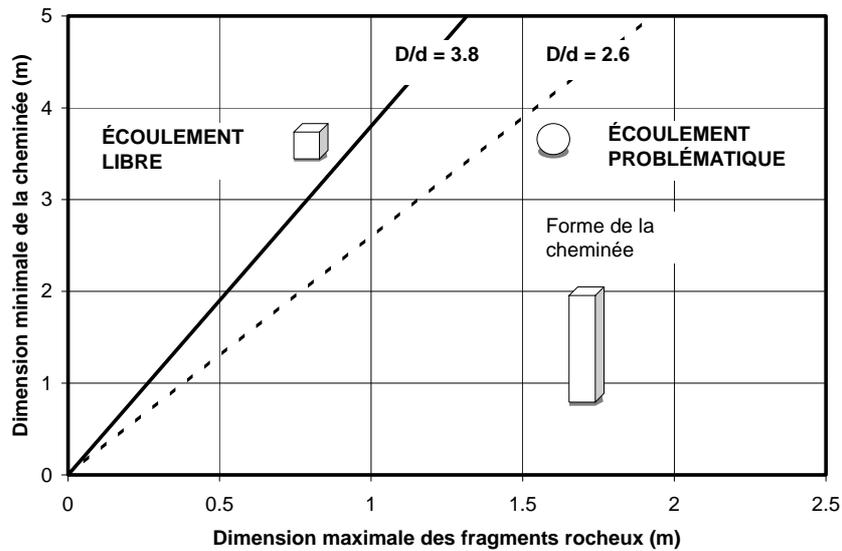


Figure 4.5. Influence de la forme des fragments rocheux sur le ratio D/d requis pour un écoulement libre, cas des cheminées verticales carrée, d'après Lessard et Hadjigeorgiou (2003).

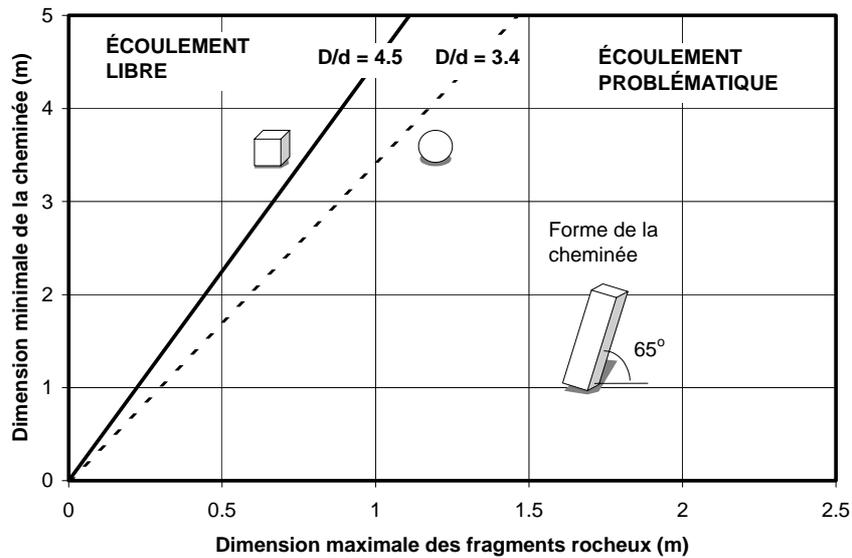


Figure 4.6. Influence de la forme des fragments rocheux sur le ratio D/d requis pour un écoulement libre, cas des cheminées inclinées carrées.

Les abaques présentés à la Figure 4.4 et à la Figure 4.5 démontrent que l'influence de la forme des fragments rocheux est plus importante que la forme de la cheminée en tant que tel. Les ratios D/d requis pour des cheminées circulaires et carrées sont relativement similaires, bien que les résultats indiquent un léger avantage pour la forme carrée. Ceci est en accord avec les commentaires généralement reçus de la part des opérateurs minier. Les cheminées inclinées

requièrent une dimension supérieure aux cheminées verticales, l'influence de l'inclinaison est considérable car le ratio D/d requis pour une cheminée carrée et des particules cubiques est de 4.5 comparativement à 3.8 pour une cheminée carrée verticale⁶⁵.

Simulation numérique de l'écoulement gravitaire du minerai par éléments distincts.

Le Particle Flow Code (PFC) est basé sur la méthode des éléments distincts. Ce code est particulièrement bien applicable afin de 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 4.7. Le modèle divise le temps réel en incréments, appelé cycles. 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. Ce modèle est simple mais très robuste. Par contre, les calculs requis pour la détection des nouveaux contacts sont intensifs. Le temps requis pour effectuer une modélisation est proportionnel au nombre de particules générées.

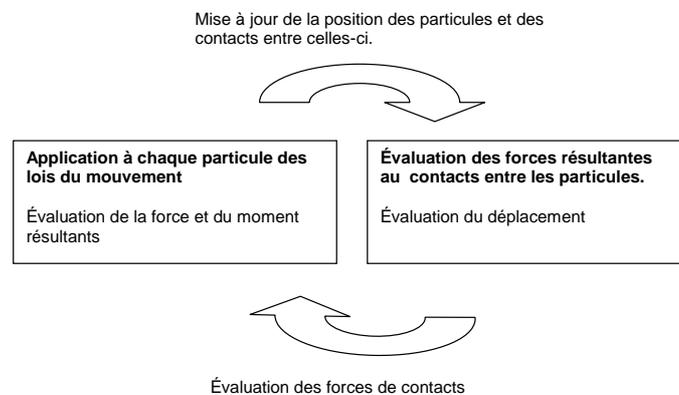


Figure 4.7. Principe du Particle Flow Code (PFC).

4.4.2 Méthodologie utilisée pour les simulations.

Les simulations pour les différentes géométries des cheminées doivent être effectuées en suivant une procédure identique. Dans chaque cas, le déversement du matériel devrait idéalement être simulé en générant des lots de particules et en les laissant tomber par gravité, tel qu'illustré à la Figure 4.8. Le volume total pour chaque lot de particules devrait être représentatif d'un

déversement typique dans une cheminée (i.e. volume d'un godet de chargeuse navette). Les particules d'un lot devraient toutes avoir terminé leur chute et atteint l'équilibre avant de générer le lot suivant. Ces procédures sont nécessaires afin de respecter les conditions réelles rencontrées.

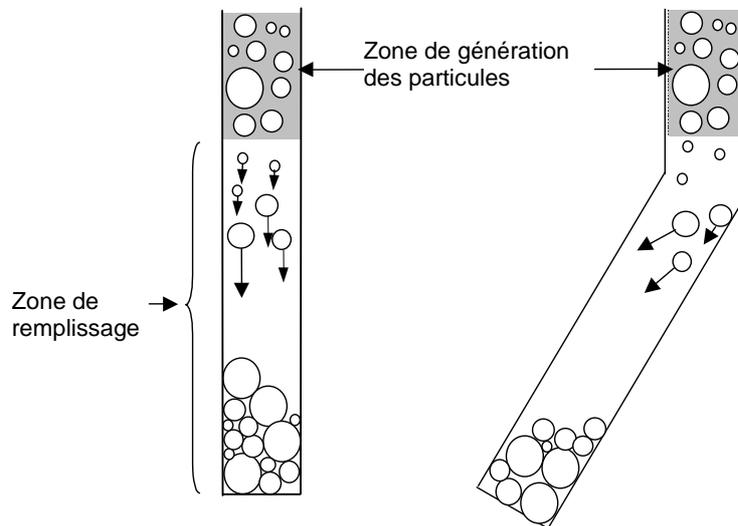


Figure 4.8. Procédure suggérée de remplissage des cheminées (illustré en 2D)

Les travaux de Lessard et Hadjigeorgiou (2003) sur l'application des éléments distincts afin de simuler les accrochages dans les cheminées ont montré la nécessité d'évaluer les problèmes d'écoulement du minerai sous un angle probabiliste. C'est cette approche qui a été retenue lors de la réalisation des abaques de conception présentés dans ce guide.

4.4.3 Prévention des arches cohésives

Le matériel circulant dans les cheminées est généralement un matériel grossier, peu propice à la formation d'arches cohésives. Toutefois une proportion de l'ordre de 10% en poids de matériel fin (< 4.2 mm) pourra faire en sorte que le matériel se comporte de façon identique à un matériel cohésif. La dimension requise pour prévenir la formation d'arches cohésives est présentée à la Figure 4.9 en fonction de la cohésion du matériel fin. L'analyse des résultats de la base de données révèle que la formation d'arches cohésives n'est pas observée dans les cheminées ayant une dimension supérieure à 3 m.

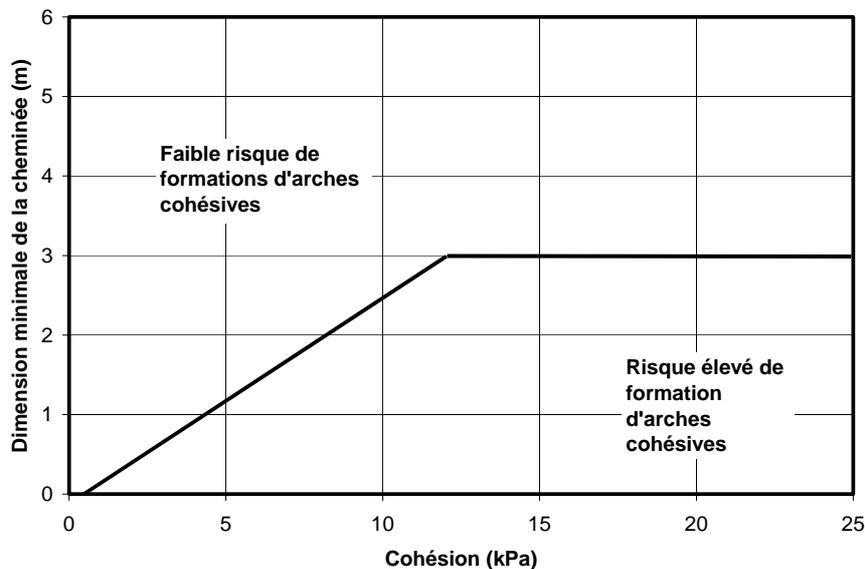


Figure 4.9. Dimension minimale requise des cheminées pour éviter la formation d'arches cohésives.

4.5 Longueur des cheminées

Les sections longues ont plus de chances d'intersecter des zones de terrain incompetent, augmentant ainsi les risques de problèmes potentiels. Les impacts générés sur les murs et au point d'arrivée du minerai sont directement proportionnels aux vitesses atteintes par le matériel et au poids volumique de celui-ci. Une longue cheminée maintenue vide sera plus sujette à être endommagée par les impacts causés par la chute du matériel. Il est donc souhaitable de minimiser le plus possible la longueur des cheminées. Une revue de la situation actuelle des cheminées dans les mines du Québec semble démontrer que la majorité des cheminées de plus de 100 m sont aux prises avec de sérieux problèmes de dégradation des parois. La longueur maximale des cheminées ne devrait pas dépasser 100 m.

4.6 Inclinaison des cheminées

Les inclinaisons des cheminées recensées dans les mines du Québec varient entre 45° et 90°. L'inclinaison la plus fréquemment observée est de 70°. Le choix de l'inclinaison est dicté par la volonté de permettre un écoulement adéquat tout en empêchant le matériel de prendre trop de vitesse. Les buts visés sont de minimiser les dommages par impact sur les murs et l'éponte supérieure et la compaction du matériel dans la cheminée. Les sections ayant une inclinaison inférieure à 60° sont généralement associées à des problèmes d'écoulement, en particulier lorsque du matériel fin circule dans celles-ci. Généralement, celles-ci sont gardées vides afin d'éviter les accrochages. Une analyse des cheminées contenues dans la base de données indique

que les accrochages par enchevêtrement rocheux sont beaucoup moins fréquents dans les cheminées dont l'inclinaison est supérieure à 75°. Une inclinaison supérieure à 75° est donc recommandée. L'inclinaison minimale devrait être portée à 85° si le matériel comporte une proportion élevée de fines (plus de 10% poids de matériel < 4 mm).

4.7 Méthode d'excavation

La qualité du massif rocheux, la durée de vie projetée, la longueur, l'inclinaison et la dimension requise des cheminées, la législation, la main d'œuvre disponible influenceront la méthode d'excavation sélectionnée. Il est toutefois primordial de choisir la méthode d'excavation en fonction de la dimension requise des cheminées et non l'inverse.

Les méthodes utilisées pour excaver les cheminées des mines visitées sont majoritairement basées sur l'utilisation d'explosif (monterie traditionnelle, monterie Alimak ou monterie inversée). Contrairement à l'expérience observée en Ontario, l'utilisation d'aléseurs (raise boring) est peu fréquente avec un total de 3% des sections excavées à l'aide de cette méthode. La méthode d'excavation par Alimak est la méthode la plus courante avec 63% des sections excavées selon cette méthode. Les monteries conventionnelles représentent une autre portion importante avec 29% des sections. La méthode par monterie inversée est plus rarement rencontrée avec 5% du total des sections.

La prédominance des méthodes d'excavation par Alimak et par monterie traditionnelle est attribuée à l'expérience de la main d'œuvre disponible et à la possibilité qu'offre ces méthodes d'installer le support de terrain lors des travaux d'excavation. Ces méthodes offrent aussi la possibilité de développer les monteries à partir d'un seul accès contrairement aux monteries inversées et alésée. Ces deux dernières méthodes requièrent le développement de deux galeries soit le départ et l'arrivée de la monterie en construction.

L'excavation par alésage est reconnue comme moins dommageable pour le massif rocheux comparativement à l'utilisation d'explosifs, ce qui peut être un avantage dans un terrain peu compétent. Toutefois, cet avantage est mitigé par la nécessité d'installer le renforcement de terrain dans une étape subséquente. Le diamètre des aléseurs disponible limite aussi la dimension des cheminées.

4.8 Point et monteries de déversement

Le point de déversement devrait si possible être conçu de manière à ce que le minerai soit déversé directement sur l'éponte inférieure de la cheminée afin de minimiser les dommages par impacts, Figure 4.10.

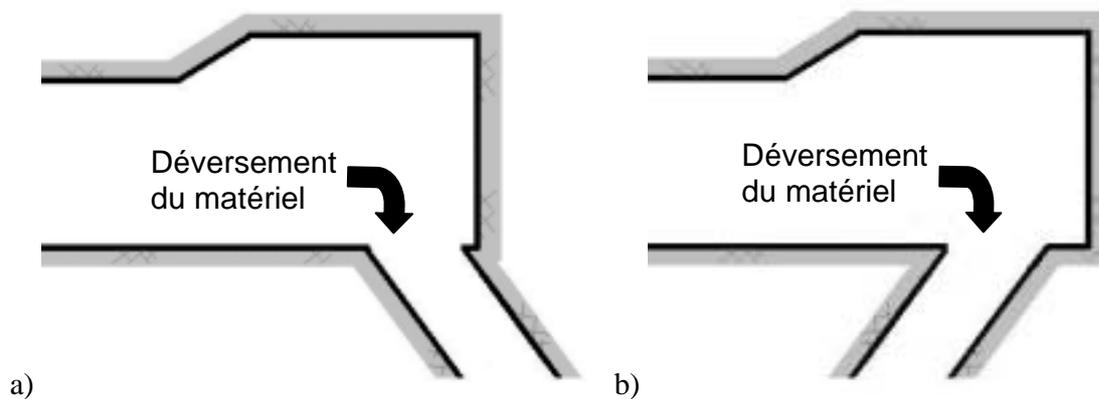


Figure 4.10. Configuration du point de déversement : a) favorable, b) défavorable

Les monteries de déversement sont nécessaires si la cheminée dessert plusieurs niveaux. Ces monteries présentent plusieurs désavantages et sont généralement associées à la dégradation des parois des cheminées. L'utilisation de cheminées plus courtes sans recours aux monteries de déversement est une configuration préférable. L'utilisation de monteries de déversement implique le maintien du matériel à un niveau plus bas que leur arrivée dans la cheminée. Ceci rend plus difficile la gestion du niveau de matériel dans les cheminées.

La Figure 4.11 illustre les dommages rencontrés systématiquement lors de l'utilisation de ces monteries. Une zone de dommages par impacts est observée à l'endroit où le minerai frappe la cheminée à la sortie de la monterie. Une zone de dommage à l'épaulement (brow) entre la cheminée et la monterie, due aux contraintes induites élevées à cet endroit, est aussi observée. Ces deux zones de dommages servent souvent d'initiateurs à une dégradation plus généralisée.

Si l'utilisation de monteries de déversement est retenue, celles-ci devraient être conçues de façon à arriver dans les murs de la cheminée. L'inclinaison des monteries devrait être supérieure à 65° . De telles pratiques peuvent permettre de réduire les dommages par impacts sans toutefois les prévenir. L'arrivée des monteries de déversement dans l'éponte supérieure devrait être évité autant que possible.

La méthode d'excavation des monteries peut aussi être une source de problèmes, en particulier si les monteries ont été excavées postérieurement à l'excavation de la cheminée par une technique de monterie inversé. Cette méthode risque plus d'endommager les parois des cheminées par rapport à l'excavation de celles-ci lors de la construction de la cheminée. Il est préférable de planifier l'excavation des monteries de déversement lors de l'excavation de la cheminée.

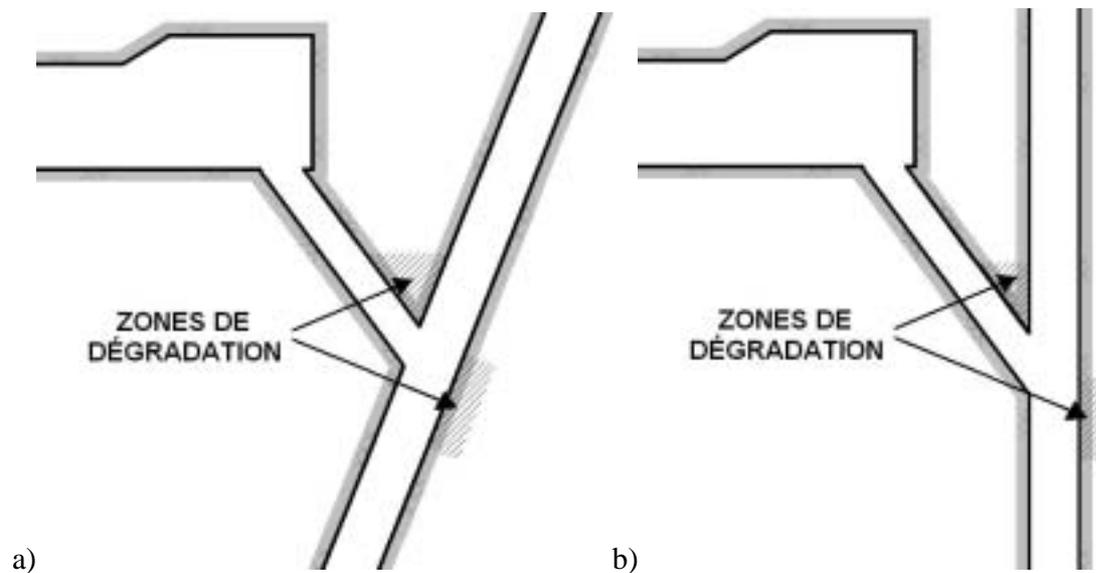


Figure 4.11. Dommages associés à l'utilisation d'une monerie de déversement a) configuration défavorable, b) configuration préférée.

4.9 Coudes et changements de directions

Les coudes (knuckles, dog legs) sont parfois retrouvés dans les cheminées afin de ralentir le matériel pour ne pas endommager les chutes et chaînes de contrôle. Cette configuration présente certains désavantages tel qu'illustré à la Figure 4.12. Une accumulation de matériel fin est souvent observée dans les changements de direction. Si ce matériel se consolide, l'accumulation crée une réduction de la dimension effective de la cheminée, créant ainsi une configuration plus propice à l'occurrence d'accrochages. Lorsque le niveau de matériel dans la cheminée est maintenu sous le coude, une zone de dommage à l'impact est susceptible de se former. Cette zone peut devenir la clé d'un problème plus généralisé. Paradoxalement, le maintien du niveau de matériel par-dessus le coude rend celui-ci inutile puisque sa fonction première est de protéger les chutes de l'impact du matériel. Un autre aspect négatif de la présence de coudes est la complication des les opérations les opérations de déblocages lorsque les accrochages sont situés plus haut que ceux-ci.

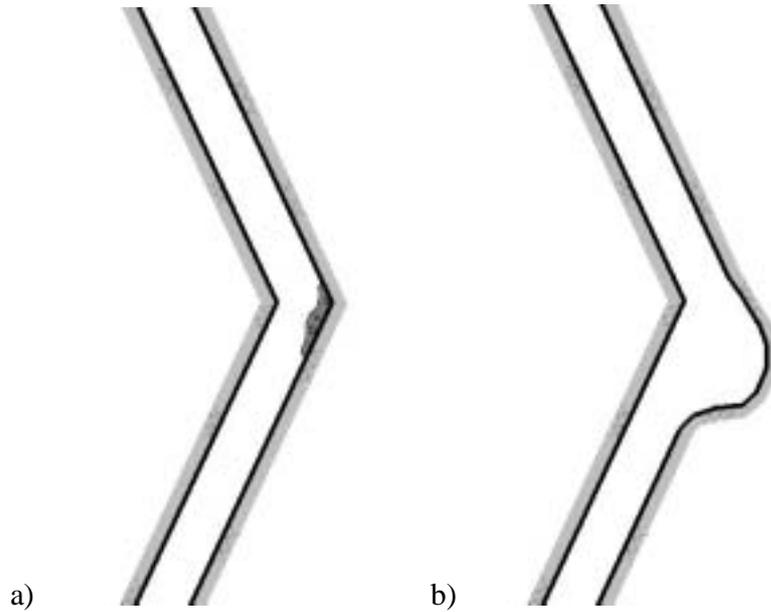


Figure 4.12. Problèmes associés aux coudes et changement de direction : a) accumulation et compaction du matériel au changement de direction, b) dommages dus à l'impact.

Il est préférable de maintenir un niveau de matériel suffisant afin de protéger les chutes et chaînes de contrôle. S'il est impossible de contrôler le niveau de matériel et que le recours aux coudes est retenu, un angle interne minimum de 120° entre les sections devrait être sélectionné, tel qu'illustré à la Figure 4.13.

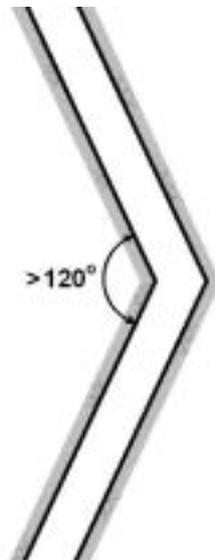


Figure 4.13. Configuration préférable des coudes, d'après Stacey et Swart (1997).

4.10 Contrôle du matériel entrant dans la cheminée.

Le contrôle de la dimension du matériel déversé dans la cheminée peut-être laissé aux opérateurs ou effectué par l'installation d'infrastructures limitant la taille du matériel tels les grizzlys et les scalpeurs, Figure 4.14.

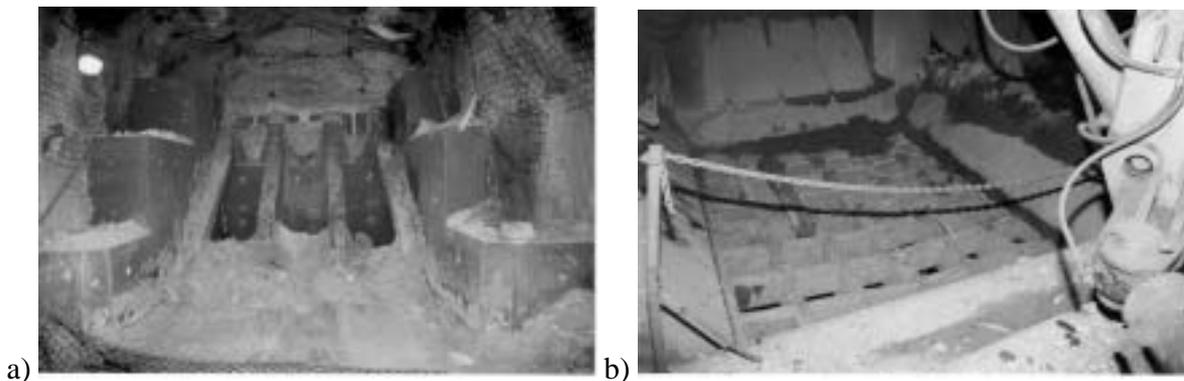


Figure 4.14. Contrôle de la dimension du matériel déversé à l'aide de: a) scalpeur, b) grizzly

Le jugement de l'opérateur n'est évidemment pas infaillible. Conséquemment, laisser reposer la responsabilité du contrôle de la dimension du matériel sur lui seul risque d'entraîner des problèmes d'accrochages. L'utilisation d'infrastructures de contrôle est assurément plus efficace. Une analyse des accrochages dans les mines souterraines du Québec a montré que lorsque les infrastructures étaient dimensionnées adéquatement, les enchevêtrements rocheux étaient inexistantes. La majorité (60%) des cheminées n'ayant pas de problèmes de dégradation est munie d'infrastructures contrôlant la dimension du matériel déversé. Les grizzlys et scalpeurs offrent aussi l'avantage de réduire grandement l'impact engendré par le matériel déversé en dispersant le matériel, l'empêchant ainsi de frapper les parois des cheminées et les infrastructures comme une masse compacte.

Les scalpeurs et les grizzlys sont souvent délaissés dès l'étape de la conception, étant donné les commentaires négatifs vis à vis leur tendance à s'obstruer. Un dimensionnement adéquat de ceux-ci, combiné avec une bonne discipline de la part des opérateurs, va contribuer à réduire ce problème. En cas d'obstruction, l'utilisation d'un brise-roche mobile permet de réduire les temps requis pour le déblocage des infrastructures.

L'utilisation des grizzlys ou des scalpeurs devrait être déterminée dès l'étape de la conception de la cheminée. L'ouverture des mailles du grizzly ou l'espacement entre les barres du scalpeur, illustré par d sur la Figure 4.15, devrait être établi en fonction de laisser passer 95% des fragments rocheux issus des sautages (soit le d_{95} de la distribution granulométrique des sautages). Cette dimension ne doit pas excéder l'ouverture du geulard du concasseur. Cette valeur de d_{95} peut être déterminée à partir d'analyse d'image des sautages à l'aide d'un logiciel tel Wipfrag. Une valeur typique de d_{95} pour une mine utilisant une méthode de minage en vrac est d'environ 60 cm. Une fois l'ouverture des grizzlis/scalpeurs fixée, la cheminée est dimensionnée en

fonction des abaques appropriés en prenant l'ouverture des grizzlys comme étant la dimension maximale des fragments rocheux.

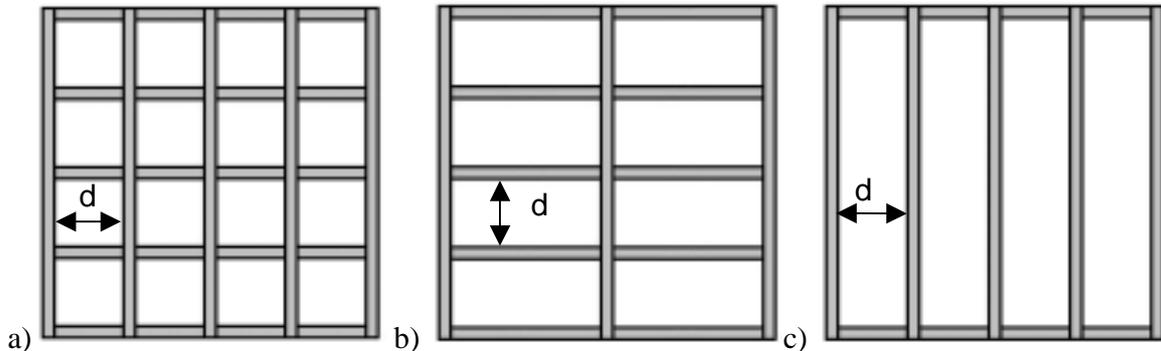


Figure 4.15. Détermination de l'ouverture «d» pour : a) grizzly à mailles carrées, b) grizzlys à mailles rectangulaires, c) scalpeurs

Des coûts de maintenance élevés sont associés aux scalpeurs étant donné la tendance des gros blocs rocheux à se coincer entre les barres. Celles-ci peuvent être endommagées lorsque les équipes de soutirage se montrent « persuasives » à « faire passer » les blocs. Les scalpeurs par contre ont moins tendance à s'obstruer que les grizzlys lorsque la proportion de fragments de grandes tailles est élevée. Les grizzlys sont généralement considérés comme requérant peu de maintenance.

4.11 Contrôle du soutirage du matériel

La plupart des sections de cheminées ont des infrastructures servant au contrôle du soutirage du matériel. Les chaînes de contrôle constituent le type d'infrastructure le plus souvent rencontré. Ces chaînes de contrôle sont utilisées seules ou montées dans une chute. Les chaînes de contrôle utilisées seules, Figure 4.16a sont rarement efficace afin de contrôler le soutirage du matériel à la lumière des commentaires recueillis. Il semble difficile, voire impossible de refermer les chaînes lorsque le matériel est en mouvement. La cheminée se vide donc souvent complètement. Un meilleur contrôle sur le soutirage du matériel est obtenu si les chaînes de contrôle sont utilisées de concert avec une chute, Figure 4.16b.



Figure 4.16. Chaînes de contrôle: a) sans chute, b) avec chute.

Afin d'éviter les dommages à ces infrastructures, un certain niveau de matériel devrait être conservé en tout temps dans la cheminée. Un système de monitoring du niveau de matériel dans les cheminées est donc un atout afin de limiter les dommages par impact. Ce matériel sert de « coussin » afin d'amortir le matériel déversé dans la cheminée. La hauteur de matériel à maintenir au-dessus des chutes peut-être évaluée à l'aide de la formule suivante, Hambley (1987) :

$$H = 1 / 2(D - D_o) \tan(45^\circ + \phi / 2)$$

Où :

- H = hauteur minimale de matériel à laisser au dessus du « head block »
- D = Dimension de la cheminée
- D_o = Largeur de l'ouverture de la chute
- φ = angle de friction interne du matériel

Une réserve de pierre concassée (crush muck) devrait être disponible près des points de déversement. Ce concassé devrait être déversé avant tout matériel grossier afin de protéger les chutes en cas de vidage complet de la cheminée. L'installation d'un système de témoins lumineux à chaque point de déversement devrait être envisagée. Ces témoins doivent être allumés dans le cas d'un vidage accidentel de la cheminée, signifiant ainsi la nécessité de déverser une quantité déterminée de pierre concassée avant de reprendre le déversement du minerai.

4.12 Renforcement du roc

Le rôle du renforcement du roc dans les cheminées est double. Il sert à sécuriser les parois lors de l'excavation des cheminées par monterie conventionnelle ou Alimak et sert à ralentir la dégradation des parois. La Figure 4.17 illustre les différents types de renforcement utilisés dans les mines souterraines.

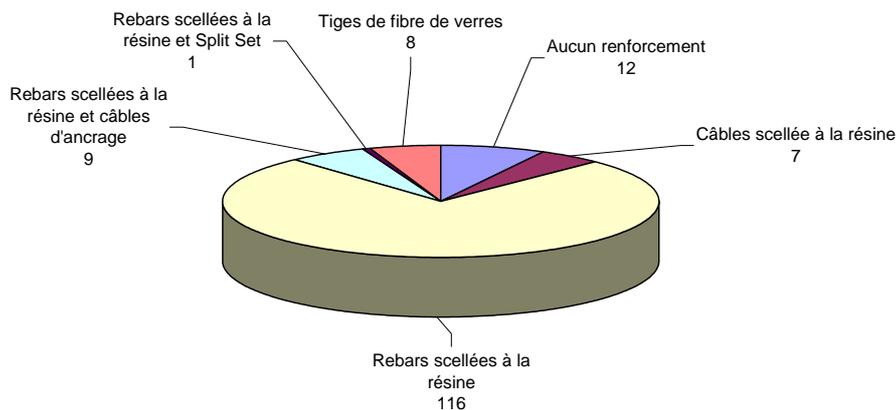


Figure 4.17. Renforcement du roc utilisé dans les mines souterraines du Québec.

Le type de renforcement du roc le plus populaire est de loin la rebar. Il est possible de croire que les vibrations dues aux chocs causés par le passage du minerai peuvent endommager l'interface rebar/résine, réduisant ainsi son efficacité. Par conséquent celles-ci semblent actuellement délaissées en faveur de câbles d'ancrage courts scellés à la résine. Les câbles présentent l'avantage d'être plus flexibles, réduisant ainsi les vibrations dues aux impacts.

Un patron serré de 1 m x 1 m ou moins est suggéré. Il est toutefois important de savoir que le renforcement du roc à lui seul ne semble pas être efficace afin de prévenir une dégradation des parois excessive dans les massifs rocheux ayant un $Q < 5$. Les boulons à ancrage mécanique ne devraient jamais être utilisés dans les cheminées. Les impacts vont détensionner rapidement les boulons mécaniques, les rendant ainsi inefficaces.

4.13 Utilisation de revêtement protecteur

Idéalement le positionnement des cheminées devrait être effectué dans un terrain propice à recevoir les cheminées. En réalité le positionnement de celles-ci est sujet à des contraintes opérationnelles la plupart du temps incontournable. L'utilisation de revêtement est à considérer si les conditions de terrains dans lesquelles doivent être situées les cheminées peuvent compromettre la longévité requise pour celles-ci.

Hambley (1987) suggère d'évaluer le support requis et l'utilisation de revêtement protecteur en fonction du RQD du massif rocheux, Tableau 4.1. Ces règles semblent toutefois plutôt conservatrices. De plus, le RQD est d'une utilité limitée afin de bien caractériser la qualité du massif rocheux.

Tableau 4.1. Support requis en fonction du RQD

RQD	Boulons requis	Béton projeté	Béton coulé
Excellent > 90	Boulonnage ponctuel	Application locale	Non requis
Bon 75 < RQD < 90	Boulonnage systématique espacement large	Application locale	Non requis
Moyen 50 < RQD < 75	Boulonnage systématique espacement moyen	4 pouces (ou plus si requis)	Non requis
Faible 25 < RQD < 50	Boulonnage systématique espacement rapproché	6 pouces (ou plus si requis)	Probable
Très faible RQD < 25	Boulonnage systématique espacement très rapproché Utilisation de grillage	6 pouces (ou plus si requis) suivi par un revêtement en béton coulé	Requis

Une analyse de 100 sections de cheminées dans les mines du Québec a démontré qu'aucune des 47 sections situées entièrement dans un massif rocheux ayant un $Q > 5$ n'a vu son volume initial augmenté de façon significative. Les sections situées en tout ou en partie dans des massifs ayant un $Q < 5$ ont présenté dans 62% des cas une dégradation importante. À la lumière de l'expérience observée, l'utilisation de revêtement devrait donc être évaluée lors du positionnement des cheminées dans un $Q < 5$ soit un massif rocheux de qualité moyenne selon Barton et al. (1974).

4.14 Monitoring

Une gestion efficace des cheminées va de concert avec l'implantation d'un programme de monitoring. Idéalement, le monitoring des cheminées devrait toucher deux aspects soit le niveau de matériel dans les cheminées et l'état des parois des cheminées (ou du revêtement protecteur). Le Tableau 4.2 présente les différentes méthodes de monitoring rencontrées dans l'industrie minière.

Tableau 4.2. Méthodes de monitoring utilisées.

	Méthodes
Niveau de matériel dans la cheminée	Relevé laser
Conditions des parois/du revêtement	Inspection visuelle à partir des points d'accès Descente d'une caméra vidéo Relevé laser par CMS Relevé par photographies d'anneaux lumineux Relevé par sonar (Afrique du Sud)

La connaissance en continu du niveau de matériel dans les cheminées est souhaitable afin de ne jamais permettre une vidange complète. Ceci dans le but de protéger les chutes. Le monitoring du niveau de matériel en continu est habituellement réalisé à l'aide de mesure de distance au laser. Les succès sont toutefois mitigés étant donné les conditions environnantes hostiles rencontrées dans les cheminées. Le brouillard et la poussière nuisent au bon fonctionnement du laser. L'expérience semble indiquer que les succès sont associés aux cheminées dont la longueur est inférieure à 30 m.

Le monitoring de la condition des parois est primordial afin de permettre une réaction rapide dès l'apparition de dommages aux parois. Le monitoring du revêtement protecteur est encore plus important afin de permettre une maintenance rapide si des dommages sont observés. L'instauration d'un programme de monitoring est d'autant plus importante si la longévité requise des cheminées est élevée.

L'inspection visuelle des parois à partir des points d'accès selon une fréquence prédéterminée est un minimum à réaliser. Ces inspections peuvent être associées à des mesures de distances par laser. Bien que ponctuelles, ces mesures servent de références pour évaluer l'élargissement de la cheminée.

Un monitoring de l'ensemble des parois des cheminées devrait être effectué régulièrement en descendant une caméra avec une lentille de type « Fish-eye ». Les meilleures observations sont réalisées lorsque la caméra est centrée au milieu de l'excavation la cheminée. Une structure conçue à cet effet devrait donc être réalisée. La descente d'un chariot sur l'éponte inférieure n'est pas vraiment utile car la visibilité est réduite et la lentille de la caméra, étant près d'un mur, se salit très rapidement. Centrer la caméra est plus facile dans une cheminée fortement inclinée ou verticale. L'éclairage devrait être puissant mais diffus (type « flood »). Les observations à la caméra sont toutefois subjectives et il est difficile d'évaluer l'ampleur de la dégradation.

Les relevés CMS peuvent être particulièrement efficaces dans les cheminées de 40 m ou moins à condition de pouvoir localiser le CMS au centre de la section de la cheminée. Il est important d'effectuer un CMS avec une résolution de l'ordre du degré afin de maximiser la précision. Une meilleure couverture de l'ensemble de la cheminée est obtenue si un relevé est effectué à chaque extrémité. Il peut être toutefois difficile, voire impossible d'effectuer un relevé par le bas de la

cheminée, selon la configuration des chutes à minerai. Le CMS permet d'évaluer un volume actuel, ce qui est préférable à la subjectivité des observations visuelles.

Un nouveau type de relevé par photographies d'anneaux lumineux projeté sur les parois des cheminées a été développé par le Centre de Technologie Noranda. Un arpentage par méthodologie par sonar est en cours d'évaluation en Afrique du Sud. Cette technologie est prometteuse étant donné qu'elle est peu influencée par les conditions adverses rencontrées dans les cheminées. Les observations visuelles, de même que les relevés laser sont affectés par le brouillard et la poussière souvent présents dans les cheminées.

5. RÉFÉRENCES

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).

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

Jenike A.W. & Johanson J.R. Tunnel Reclaim from Ore Stockpiles. http://www.jenike.com/pages/education/cases/stockpile_study/stockpiles.html. (2003)

Kirsten H.A.D. & Klokow J.W., Control of Fracturing in Mine Rock Passes. *Proc. 40th Int. Congress on Rock Mech.*, Montreux, Suisse. pp.203-212 (1979).

Lessard J.F. & Hadjigeorgiou J. Design Tools to Minimize the Occurrence of Ore Pass Interlocking Hang-ups in Metal Mines. *IRSM 2003- Technology Roadmap for Rocks Mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, (2003).

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).