

2008

Dimensionnement des chutes à minerais

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. (2008). *Dimensionnement des chutes à minerais* (Rapport n° R-549). 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.

É

Sécurité des outils, des machines et des procédés industriels

Études et recherches

RAPPORT R-549



Dimensionnement des chutes à minerais

*John Hadjigeorgiou
Jean-François Lessard*



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

Mission *travaillent pour vous !*

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2008

ISBN : 978-2-89631-237-5 (version imprimée)

ISBN : 978-2-89631-238-2 (PDF)

ISSN : 0820-8395

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,
février 2008



Sécurité des outils, des machines et des procédés industriels

Études et recherches

■ RAPPORT R-549

Dimensionnement des chutes à minerai

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

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



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

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 observée dans 12 mines souterraines québécoises a démontré que les problèmes d'écoulement du matériau dans les systèmes de cheminées sont fréquemment rencontrés. Ces problèmes ont été classifiés en deux catégories distinctes, telles que proposées par Emmerich (1992); soit les accrochages et les blocages. Les accrochages sont définis comme des obstructions empêchant l'écoulement dans la cheminée proprement dite. Les blocages sont définis comme une obstruction dans les chutes à minerai. Ces chutes à minerai, l'équivalent des trémies pour les silos, servent au contrôle du soutirage du matériau de la cheminée. L'expérience démontre que la plupart des problèmes de blocages ont des similitudes d'une mine à l'autre.

Les blocages dans les chutes à minerai posent actuellement un problème au niveau de la sécurité des travailleurs. Au Québec, entre 1987 et 2005, 26 accidents indemnisés reliés à l'opération des chutes à minerai dans les mines souterraines ont été recensés par l'Association Paritaire du Secteur Minier (APSM) et par l'Association Minière du Québec (AMQ). En Ontario, selon le MASHA (Beauchamp, 1999), pour la période de 1989 à 1999, on dénombrait 13 accidents indemnisés liés à l'utilisation des chutes. Le déblocage des chutes est une activité potentiellement risquée et occasionnant souvent des blessures et des maux de dos.

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'améliorer la sécurité des travailleurs affectés à l'opération des chutes à minerai. Les objectifs spécifiques sont :

- évaluer l'efficacité des différents designs de chutes habituellement rencontrés dans l'industrie minière en fonction des commentaires recueillis par les opérateurs miniers;
- évaluer les règles de dimensionnement des chutes à minerai proposées dans la littérature en fonction des résultats observés sur le terrain;
- développer des outils de travail pratiques et applicables qui permettront d'améliorer la géométrie des chutes à minerai afin de minimiser ou d'éliminer les blocages.

L'influence de quatre aspects de la géométrie des systèmes chute/cheminée sur la formation de blocages a été évaluée soit:

- le dimensionnement de l'ouverture des chutes;
- l'inclinaison de la glissière de la chute;
- l'inclinaison de la cheminée;
- la configuration du système chute/cheminée.

La méthodologie utilisée est basée sur l'analyse empirique d'une base de données contenant les informations sur 89 chutes à minerai, sur des essais en laboratoire à l'aide de modèles physiques et sur la modélisation numérique par éléments distincts.

Un guide de conception des chutes à minerai a été élaboré dans le cadre de ce projet. Les règles de conception proposées dans ce guide sont basées sur les résultats de l'analyse effectuée, de la littérature actuelle, de même que sur les commentaires recueillis lors des investigations sur les sites miniers. Ce guide, à l'intention des ingénieurs miniers, fournit des outils de conception permettant de :

- dimensionner adéquatement les chutes à minerai afin d'éviter les problèmes de blocages par enchevêtrements rocheux;
- choisir des stratégies visant à minimiser la possibilité de formation d'arches cohésives;
- concevoir les cheminées de manière à diminuer l'étendue de la zone de matériau passif à la base des cheminées;
- sélectionner le système chute/cheminée le plus adéquat selon les besoins.

L'industrie des mines souterraines devrait bénéficier des nouveaux outils de conception présentés ici. Par conséquent, les résultats de ce projet devraient réduire l'aspect intuitif souvent présent lors de la conception des chutes à minerai, permettant ainsi une utilisation plus sécuritaire.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
2	Rappel de la problématique, de l'état des connaissances et des objectifs de recherche .	4
2.1	Hypothèse de recherche	4
3	Méthodologie	4
3.1	Revue exhaustive de la situation actuelle	4
3.2	Évaluation des règles de conception des chutes actuellement disponibles :.....	5
3.3	Analyse de l'influence de la configuration des chutes et des cheminées à partir d'un modèle réduit en laboratoire	6
3.3.1	Caractérisation du matériau	7
3.3.2	Essais d'écoulement	9
3.4	Modélisation numérique de l'influence de la géométrie des chutes sur l'occurrence des blocages :	11
3.4.1	Modélisation par éléments distincts.....	11
3.4.2	Modèles numériques développés	12
3.4.3	Calibration du modèle.....	13
4	Résultats.....	13
4.1	Évaluation de l'efficacité des différents designs de chutes habituellement rencontrés dans l'industrie minière.....	13
4.1.1	Types de chute rencontrés dans la base de données	14
4.1.2	Configurations des systèmes chutes/cheminées de la base de données	17
4.2	Évaluation des règles de conception actuelles	21
4.2.1	Dimensionnement de l'ouverture requise des chutes	21
4.2.2	Inclinaison de la glissière des chutes	35
4.2.3	Inclinaison des cheminées.....	38
4.3	Développement d'outils de travail pratiques pour les ingénieurs miniers	43
4.3.1	Élaboration d'un guide de conception.....	43
4.3.2	Élaboration de modèles numériques permettant d'évaluer l'écoulement du matériau. 44	
5	Discussion des résultats	45
6	Conclusion	46
6.1	Dimensionnement requise pour l'ouverture de la chute.....	47
6.1.1	Dimensionnement requis pour prévenir les enchevêtrements rocheux.....	47
6.1.2	Dimensionnement requis pour prévenir la formation d'arches cohésives.....	48
6.2	Applicabilité des résultats.....	48
6.3	Retombées éventuelles.....	49
7	Références.....	49

1 Introduction

La manutention du minerai dans la plupart des mines souterraines est basée sur un réseau de cheminées à minerai (Figure 1.1). Ces cheminées sont des excavations verticales ou inclinées permettant de transférer le minerai des niveaux supérieurs de la mine aux niveaux inférieurs.

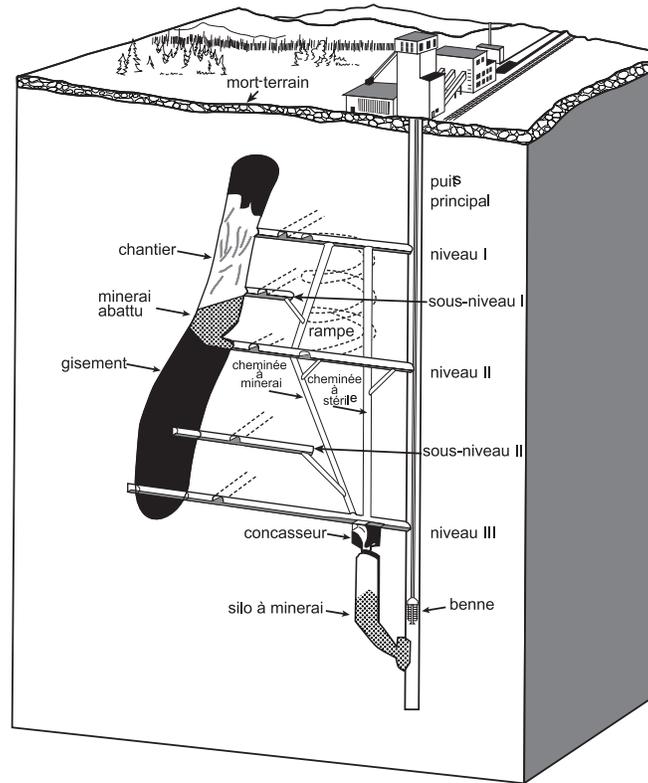


Figure 1.1. Système de manutention du minerai dans une mine souterraine, modifiée d'après Atlas Copco (2001).

Une revue exhaustive de la conception des cheminées à minerai et des problèmes opérationnels rencontrés a été réalisée dans le cadre du projet de l'IR SST 099-089 *Conception des cheminées à minerai et à stérile*. Plusieurs mines souterraines du Québec avaient alors été visitées afin de constituer une base de données sur les cheminées à minerai et à stérile.

L'analyse des données recueillies a démontré que la plupart des mines visitées était confrontée à des problèmes d'écoulement du matériau. Ces problèmes ont été classifiés en deux catégories distinctes, telles que proposées par Emmerich (1992), soit les accrochages et les blocages. Les accrochages sont définis comme des obstructions empêchant l'écoulement dans la cheminée proprement dite. Les blocages sont définis comme une obstruction dans les chutes à minerai. Ces chutes à minerai sont l'équivalent des trémies pour les silos et servent au contrôle du soutirage du matériau de la cheminée. La fonction des chutes peut être de permettre au matériau de passer dans la section suivante du système de cheminée ou bien de permettre le chargement de camions ou de wagons. La Figure 1.2 illustre les zones d'accrochages et de blocages dans une cheminée.

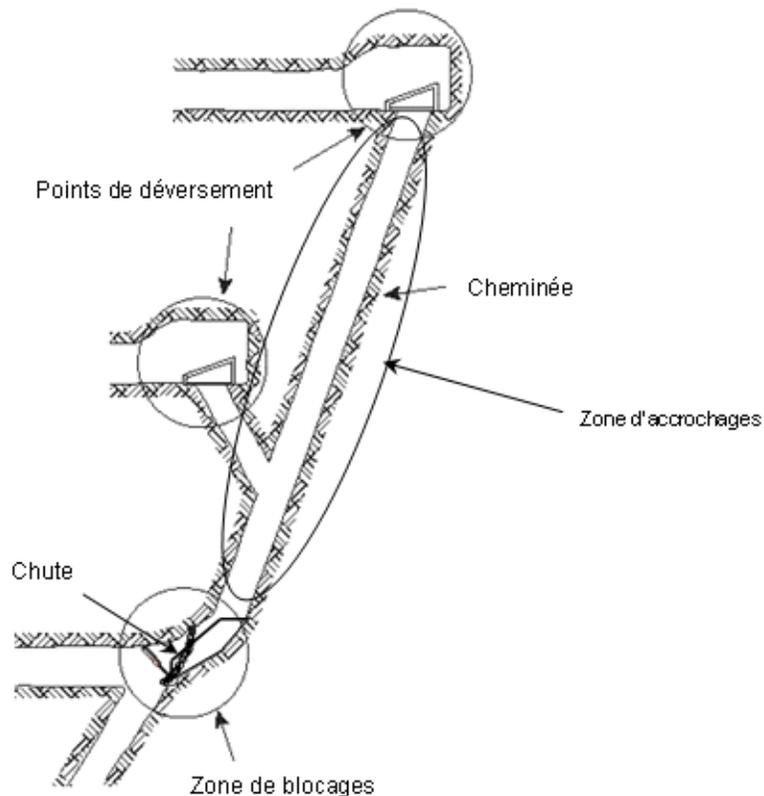


Figure 1.2. Problème d'écoulements dans les cheminées

Les blocages dans les chutes à minerai posent actuellement un problème au niveau de la sécurité des travailleurs. Au Québec, entre 1987 et 2005, 26 accidents indemnisés liés à l'opération des chutes à minerai ont été recensés selon les statistiques tenues par l'Association Paritaire du Secteur Minier (APSM) et par l'Association Minière du Québec (AMQ). En Ontario, selon le MASHA (Beauchamp, 1999), pour la période de 1989 à 1999, on dénombrait 13 accidents indemnisés liés à l'utilisation des chutes. Le déblocage des chutes est une activité potentiellement risquée et occasionnant souvent des blessures et des maux de dos. Voici des extraits de rapports d'incidents fournis par l'APSM :

L'employé essayait de faire descendre du minerai qui était accroché dans une chute à minerai à l'aide d'une barre. Lorsque le minerai décrocha subitement, la barre le frappa au thorax côté gauche.

En délogeant du minerai dans une chute à l'aide d'une barre, l'employé a ressenti une douleur à l'omoplate droite.

En débloquent la chute à minerai avec une barre, une roche heurta la barre et il a reçu celle-ci sur le côté de la tête.

En train de laver dans la cheminée à minerai car la chute était bloquée puis une pierre s'est détachée et m'a frappé le pied droit.

La Figure 1.3 illustre l'arrangement typique d'une chute à minerai à la base d'une cheminée. L'ouverture des chaînes de contrôle permet de laisser s'écouler le matériau hors de la cheminée. Un poussoir est souvent installé afin de faciliter la fermeture des chaînes. Le plancher de la chute, ou glissière, est habituellement recouvert de plaques d'acier afin d'augmenter la résistance à l'usure par abrasion et de faciliter l'écoulement du matériau.

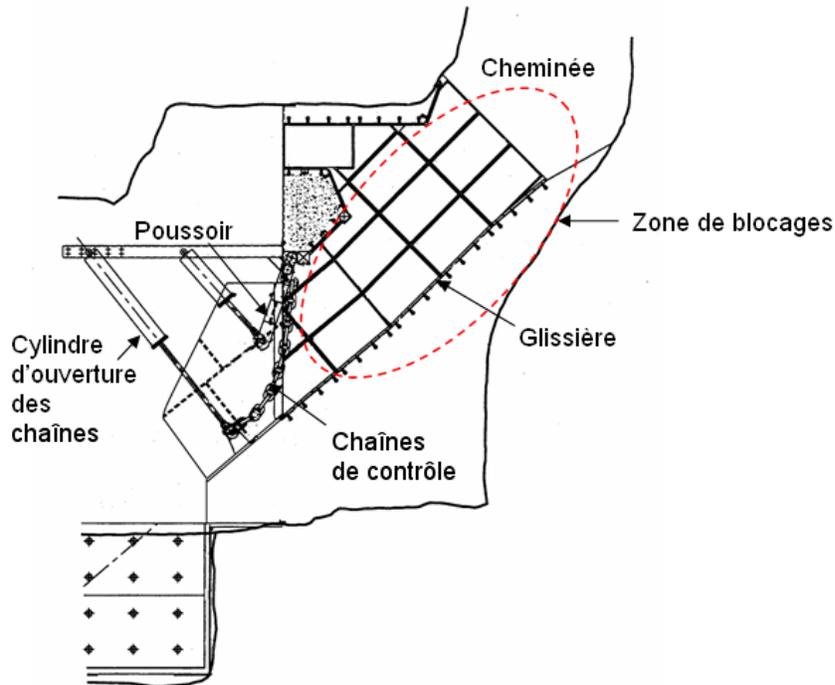


Figure 1.3. Arrangement typique d'une chute à minerai.

Plusieurs sites miniers du Québec ont été visités dans le cadre du projet de l'IRSST 099-089 *Conception des cheminées à minerai et à stérile* afin de constituer une base de données illustrant la situation actuelle en ce qui concerne l'utilisation des cheminées à minerai. Des données relatives aux chutes à minerai avaient été recueillies lors de cette campagne. Dans le cadre du projet actuel, d'autres opérations minières ont été visitées afin de compléter l'information sur les chutes. Le Tableau 1.1 présente la fréquence des problèmes de blocages dans les 12 mines souterraines québécoises de la base de données.

Tableau 1.1. Fréquence des blocages dans les chutes de douze mines souterraines québécoises.

Fréquence	Nombre de mines
Jamais	3
Occasionnel (moins d'un par semaine)	4
Fréquent (plus d'un par semaine)	5

La fréquence élevée des problèmes de blocages indique que la conception des chutes doit être améliorée afin de minimiser l'occurrence de ceux-ci. Une fréquence moins élevée de blocages devrait minimiser les interventions requises de la part des travailleurs. L'expérience démontre que ces interventions comportent toujours une part de risque.

2 Rappel de la problématique, de l'état des connaissances et des objectifs de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'améliorer la sécurité des travailleurs affectés à l'opération des chutes à minerai. Les objectifs spécifiques sont :

- évaluer l'efficacité des différents designs de chutes habituellement rencontrés dans l'industrie minière en fonction des commentaires recueillis par les opérateurs miniers;
- évaluer les règles de dimensionnement des chutes à minerai proposées dans la littérature en fonction des résultats observés sur le terrain;
- développer des outils de travail pratiques et applicables qui permettront d'améliorer la géométrie des chutes à minerai afin de minimiser ou d'éliminer les blocages.

2.1 Hypothèse de recherche

L'expérience démontre que la plupart des problèmes de blocages reliés à l'opération des chutes à minerai ont des similitudes d'une mine à l'autre, Lessard et Hadjigeorgiou (2006). Ces problèmes sont généralement présents à toutes les étapes de la durée de vie opérationnelle de la cheminée à minerai. Quatre aspects reliés à la conception des chutes peuvent être problématiques:

- un dimensionnement inadéquat de l'ouverture des chutes présentera une restriction importante à l'écoulement du matériau;
- une inclinaison inadéquate de la glissière de la chute va nuire à l'écoulement du matériau;
- une inclinaison inadéquate de la cheminée va causer la présence d'une zone de matériau passif dans la chute, réduisant le canal d'écoulement et favorisant l'occurrence de blocages;
- la configuration du système chute/cheminée va influencer l'écoulement du matériau.

L'analyse empirique de la base de données, des essais en laboratoire à l'aide de modèles physiques et la modélisation numérique par éléments distincts permettront d'évaluer l'influence des aspects de la géométrie sur la formation de blocages.

3 Méthodologie

La méthodologie utilisée a fait appel à l'analyse des données de terrain, l'utilisation d'un modèle physique et la modélisation numérique afin d'analyser l'influence de la configuration des chutes à minerai sur l'occurrence de blocages.

3.1 Revue exhaustive de la situation actuelle

Une base de données comprenant 89 chutes à minerai ou à stérile a été constituée à partir des informations recueillies dans 12 mines souterraines québécoises. Les mines ayant fait l'objet d'une visite sont identifiées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Sites miniers utilisés dans la base de données.

Mine	Minerai extrait	Tonnage (t/j)
Mine Louvicourt (Les Ressources Aur)	cuivre, zinc, or, argent	4 300
Mine Bell Allard (Noranda)	zinc, cuivre	2 200
Mine Bouchard-Hébert (Breakwater Resources)	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	3500
Mine Mouska (Cambior)	or, argent	450
Mine Kiena (Les Mines MacWatters)	or, argent	2 000
Mine Copper Rand (Ressources Campbell)	cuivre	Variable
Mine Joe Man (Ressources Campbell)	cuivre	Variable
Mine Laronde (Agnico Eagle)	or, zinc, cuivre	5 000

Une partie des données ont été recueillies dans le cadre du projet de l'IRSST *Conception des cheminées à minerai et à stérile* (projet 099-089) Hadjigeorgiou & Lessard 2004. Des visites subséquentes dans d'autres mines du Nord-Ouest québécois ont permis de compléter la cueillette des données.

3.2 Évaluation des règles de conception des chutes actuellement disponibles :

Une revue des règles de conception des chutes à minerai disponibles dans la littérature a aussi été effectuée. Les règles de design disponibles ont été évaluées en fonction des données de terrain. Hambley (1987), Ferguson (1991), Kvapil (1965), Peele (1949), Parizeau (1966) et Beus et al. (2001) sont les principales références en la matière. Parmi celles-ci, Hambley (1987), Ferguson (1991) et Kvapil (1965) sont probablement les plus complètes. Il existe un consensus à l'effet que les facteurs suivants auront une influence importante sur l'écoulement du matériau dans les chutes:

- la dimension de l'ouverture des chutes;
- l'inclinaison de la glissière de la chute;
- l'inclinaison de la cheminée.

La base de données a donc été analysée afin de vérifier si la conception actuelle de ces trois facteurs suivait les règles de conception proposées par ces auteurs.

3.3 Analyse de l'influence de la configuration des chutes et des cheminées à partir d'un modèle réduit en laboratoire

Un modèle physique de chute à minerai a été réalisé afin d'évaluer l'influence de la configuration des chutes à minerai sur l'occurrence des blocages (Figure 3.1). L'objectif visé était l'élaboration de règles directrices permettant de dimensionner l'ouverture des chutes et d'analyser l'influence de l'inclinaison de la cheminée et de la glissière sur l'écoulement du matériau. L'utilisation d'un modèle physique devait aussi permettre de calibrer le modèle numérique développé afin d'évaluer l'écoulement du matériau dans les chutes.

La première phase d'expérimentation, sur des matériaux secs, a permis d'évaluer l'influence de la configuration des chutes sur la formation des blocages par enchevêtrements rocheux. Une deuxième phase sur des matériaux humides a permis d'évaluer la formation d'arches cohésives. Le modèle construit est de type "générique", c'est-à-dire qu'il représente une conceptualisation d'un système chute/cheminée plutôt qu'une reproduction à échelle réduite d'un système existant, soit dans une mine, soit dans la littérature.

L'utilisation d'un modèle physique est une alternative intéressante afin d'évaluer un phénomène à l'intérieur de conditions contrôlées. Les modèles physiques sont une duplication d'un phénomène idéalisé. Il est donc important de ne retenir que les éléments pertinents au problème. Les modèles réduits peuvent par contre être sujet à un phénomène de distorsion. Dans le cas actuel, l'utilisation d'un modèle physique à échelle réduite était nécessaire. Les paramètres adimensionnels tels l'angle de friction, le coefficient de Poisson et les déformations ne sont pas sujet à l'effet de distorsion. Selon Hambley (1987), un des mécanismes prépondérants dans le phénomène des enchevêtrements rocheux est l'angle de friction du matériau. Ce paramètre, étant adimensionnel, rend le modèle peu sensible à l'effet de distorsion.

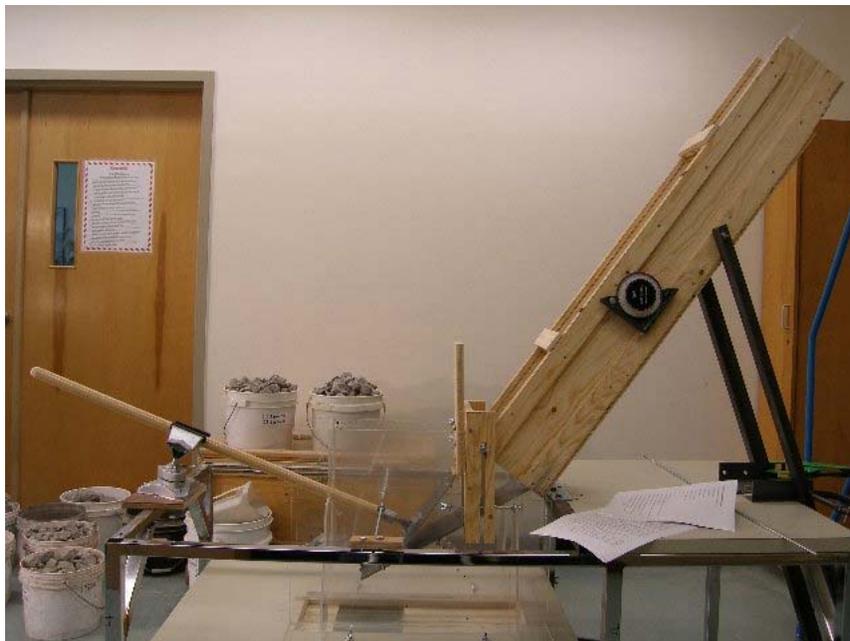


Figure 3.1. Vue de côté du modèle physique.

Plusieurs séries d'expériences ont été effectuées pour évaluer le phénomène de blocages dans les chutes. Le matériau testé était du calcaire concassé. Trois distributions granulométriques différentes ont été testées. L'influence de plusieurs facteurs sur l'occurrence des blocages a pu ainsi être évaluée tel que:

- l'inclinaison de la cheminée;
- l'inclinaison de la glissière;
- la largeur d'ouverture de la chute (D_0);
- la hauteur d'ouverture de la chute (H_0);
- la distribution granulométrique du matériau;
- la teneur en eau du matériau.

3.3.1 Caractérisation du matériau

Le matériau utilisé pour simuler le minéral fragmenté était un calcaire concassé. Trois différentes distributions granulométriques ont été testées afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur la formation de blocages (Tableau 3.2). Deux des distributions provenaient directement des sacs de matériaux. Une troisième distribution était constituée d'un mélange effectué dans le laboratoire.

Tableau 3.2. Type de matériau et provenance.

Type de matériau	Provenance
Calcaire 0 à $\frac{3}{4}$ de pouce (matériau A)	Carrière Drapeau, Québec
Calcaire de $\frac{3}{4}$ de pouce (matériau B)	Carrière Drapeau, Québec
Calcaire de $\frac{1}{2}$ à $\frac{3}{4}$ de pouce (matériau C)	Mélange fait en laboratoire

3.3.1.1 Distribution granulométrique

La distribution granulométrique obtenue par tamisage pour chacun des trois matériaux est illustrée à la Figure 3.2. La principale différence entre les trois distributions était l'étendue de celles-ci, allant de bien étalée (matériau A), peu étalée (matériau C), à uniforme (matériau B). Pour les trois distributions, les plus grandes particules pouvaient passer un tamis ayant une ouverture de 26 mm, mais étaient retenues sur un tamis de 19 mm. Les lots des matériaux A et B ont été tamisés sur le site de la carrière Drapeau. Une vérification a été faite sur un échantillon au laboratoire. Le matériau C a été préparé au laboratoire spécifiquement pour les tests et la courbe C de la figure 3.2 présente sa distribution granulométrique.

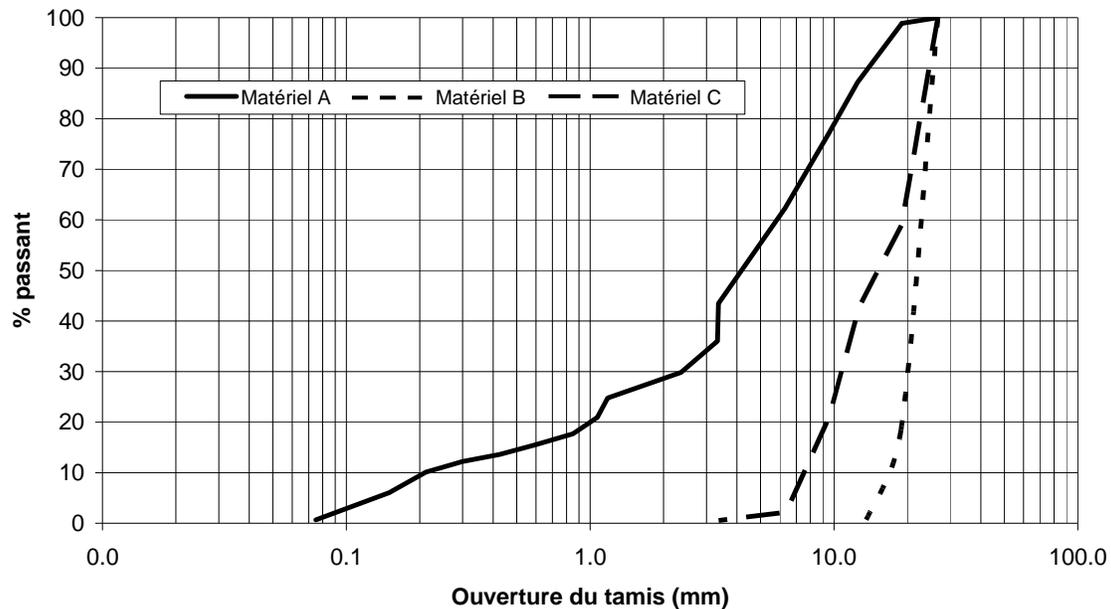


Figure 3.2. Distribution granulométrique des trois matériaux testés.

Il est à noter que le matériau A contient 10% poids de fragments passant 0.25 mm. Par conséquent, selon Jenike (1961), ce matériau est susceptible de former des arches cohésives.

3.3.1.2 Formes des fragments rocheux

Le Tableau 3.3 présente la forme des particules évaluée en laboratoire pour différentes fractions retenues sur des tamis d'ouverture allant de 6.7 mm à 25.4 mm. Les définitions de longueur, épaisseur et largeur d'un fragment sont présentées à la Figure 3.3. Les rapports entre la longueur, l'épaisseur, la largeur, le diamètre équivalent et l'ouverture des tamis sont présentés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3. Dimension des fragments rocheux

Ouverture des tamis d (mm)	Longueur L (mm)	Épaisseur T (mm)	Largeur B (mm)	Ratio L/d	Ratio T/d	Ratio B/d	Ratio L/T	Ratio B/T
6.7	14.4	4.4	8.5	2.1	0.7	1.3	3.3	1.9
9.4	20.1	6.0	12.3	2.1	0.6	1.3	3.4	2.0
13.3	25.0	8.6	17.2	1.9	0.6	1.3	2.9	2.0
19.1	42.1	15.7	27.2	2.2	0.8	1.4	2.7	1.7
25.4	51.1	20.8	35.1	2.0	0.8	1.4	2.5	1.7
			Moyenne	2.1	0.7	1.3	3.0	1.9
			Écart-Type	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2

Il est intéressant de constater que les ratios L/d (longueur fragment/ouverture), T/d (épaisseur fragment/ouverture) et B/d (largeur fragment/ouverture) sont relativement similaires d'une classe de fragments à l'autre. Les ratios moyens L/d , T/d et B/d sont respectivement égaux à 2.1, 0.7 et 1.3. Ce dernier résultat est particulièrement intéressant, car il indique que pour chacune des différentes classes, la distance diagonale de l'ouverture d'un tamis est un bon indicateur de la largeur (ou dimension intermédiaire) des fragments rocheux qui passeront au travers de ce tamis. Les résultats typiques des sautages sont généralement des fragments rocheux plus ou moins allongés. En se basant sur un calcaire concassé, il est possible de supposer que la pratique d'utiliser l'ouverture des grizzlys comme indicateur de la dimension maximum des fragments rocheux, tel que proposé par Hambley (1987), n'est pas justifiée.

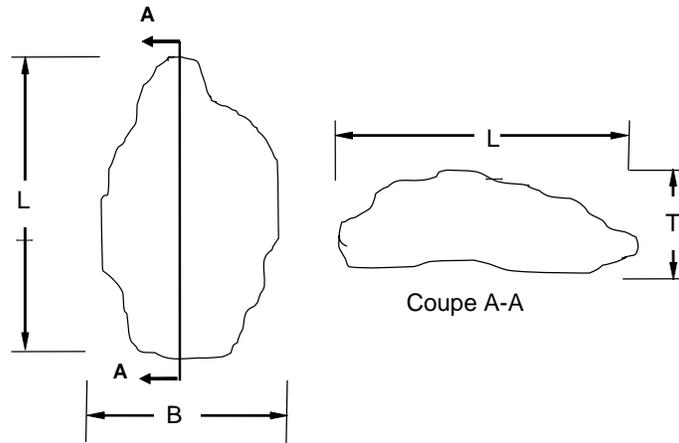


Figure 3.3. Définition de la longueur (L), la largeur (B) et l'épaisseur (T) des fragments rocheux.

3.3.2 Essais d'écoulement

Les tests d'écoulement ont été réalisés sur les trois matériaux décrits précédemment en utilisant la même procédure. La cheminée était d'abord remplie au complet (soit une hauteur de matériau d'environ 120 cm) puis un soutirage contrôlé était effectué en trois étapes (Figure 3.4). Chaque étape représentait le soutirage d'un tiers de la cheminée.

Pour chacun des trois matériaux, trois différentes inclinaisons de cheminée ont été testées soit 60° , 70° et 80° . Ces inclinaisons ont été choisies en fonction des résultats de la base de données sur la conception des cheminées dans les mines souterraines québécoises présentée dans Hadjigeorgiou et Lessard (2004). Ces inclinaisons sont aussi représentatives de la gamme des inclinaisons recommandées par les règles de conception proposées dans la littérature.

Trois inclinaisons de glissière de chutes, soit 35° , 40° et 45° , ont été testées pour chacune des inclinaisons de cheminée. Ces valeurs ont été choisies afin d'être représentatives de la gamme des inclinaisons recommandées par Ferguson (1991). Différentes largeurs d'ouvertures (D_o) et hauteurs d'ouvertures (H_o) ont été testées pour chacune des combinaisons d'inclinaisons. Deux essais étaient réalisés pour chacune des configurations. Chaque essai était filmé à l'aide d'une caméra vidéo digitale.

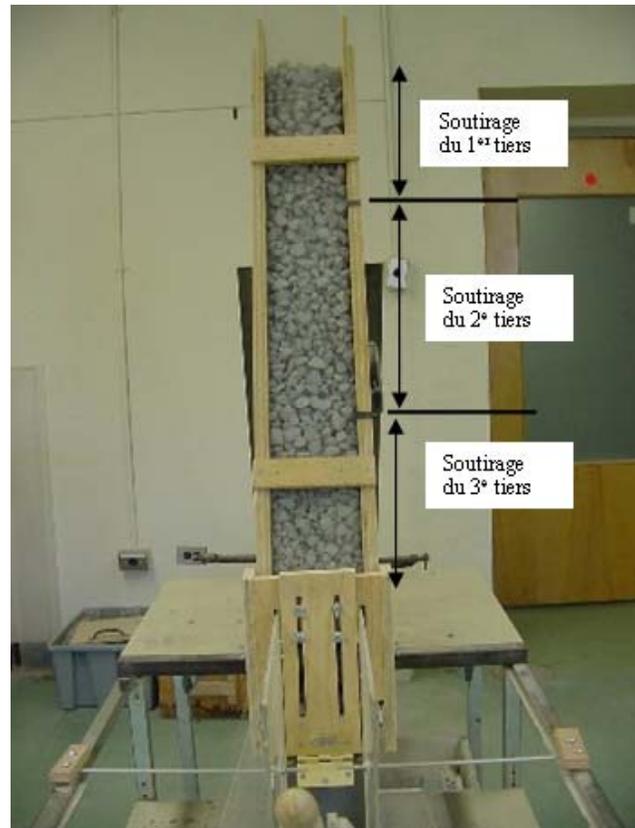


Figure 3.4. Identification des trois zones de soutirage.

Le nombre de blocages observé pour chacun des soutirages était noté de même que l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon et la hauteur du matériau restant dans la cheminée après le soutirage final du matériau. Un blocage typique pour le matériau B est illustré à la Figure 3.5.



Figure 3.5. Blocage observé dans la chute, matériau B, $D_0 = 10$ cm, $H_0 = 8$ cm.

3.4 Modélisation numérique de l'influence de la géométrie des chutes sur l'occurrence des blocages :

L'influence de la géométrie des chutes a été évaluée à l'aide de la modélisation numérique par éléments distincts. Les travaux de modélisation effectués dans le projet de l'IRSST 099-089 *Conception des cheminées à minerais et à stérile* (Hadjigeorgiou et Lessard 2004) ont prouvé l'applicabilité de ces modèles pour l'étude de l'écoulement granulaire. Ces modèles sont particulièrement appropriés pour l'étude de l'écoulement du matériau dans les chutes à minerais.

3.4.1 Modélisation par éléments distincts

Le Particle Flow Code (PFC) Itasca (1999) est basé sur la méthode des éléments distincts et a été utilisé pour modéliser l'écoulement du matériau 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 3.6. 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. Le modèle 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 principe de calcul est simple et 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.

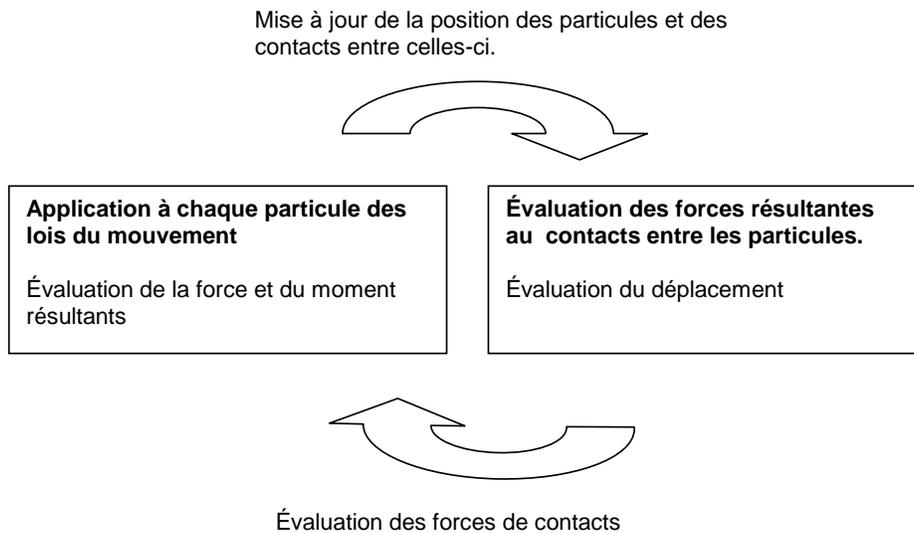


Figure 3.6. Principe du Particle Flow Code (PFC) (d'après Itasca, 1999).

3.4.2 Modèles numériques développés

Afin d'analyser les relations entre la configuration des chutes à minerai (hauteur et largeur de l'ouverture et inclinaison de la glissière), trois modèles numériques de cheminées à minerai et de chutes ont été développés avec PFC3D. Ces modèles ont été développés de manière à ce que l'utilisateur puisse modifier facilement la configuration. Un de ces modèles est présenté à la Figure 3.7. La liste et la définition des variables ajustables sont présentées au Tableau 3.4.

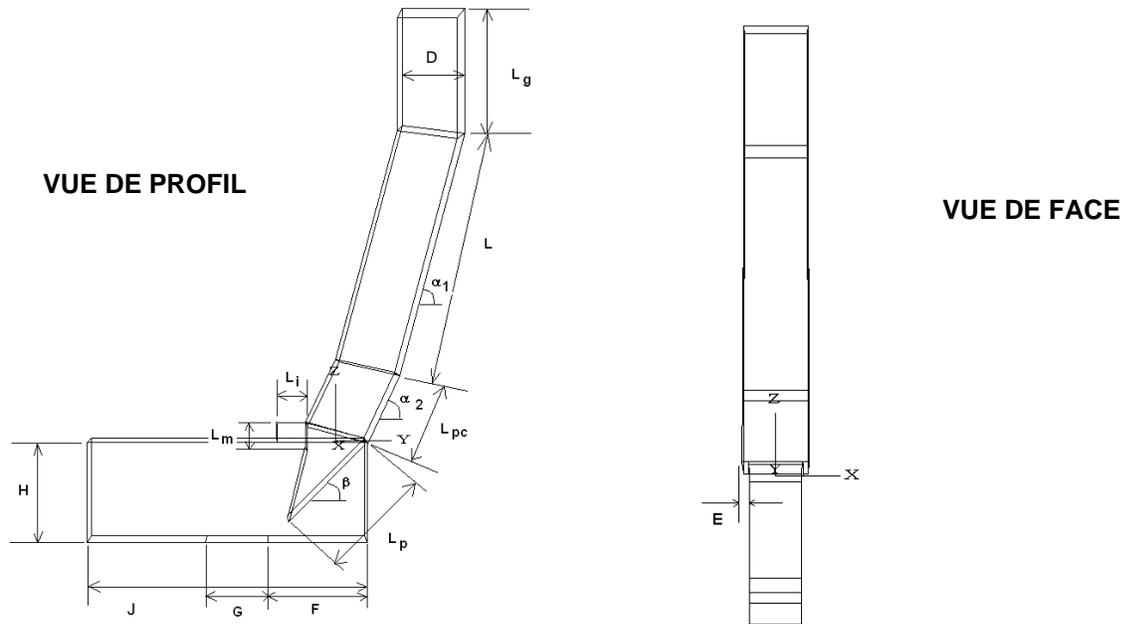


Figure 3.7. Modèle numérique de chute à minerai.

Tableau 3.4. Variables à définir pour établir la géométrie de la cheminée

Variable (selon la Figure 1)	Définition de la variable
D	Dimension de la cheminée carrée
L	Longueur de la partie inclinée de la cheminée
L_g	Longueur de la zone de génération des particules
L_{pc}	Longueur du plancher de la cheminée
L_p	Longueur de la glissière
L_m	Hauteur de la poutre de tête
H	Hauteur de la galerie
J	Longueur de la galerie
E	Épaisseur des murs de la chute
F	Distance de l'ouverture (à partir du mur du fond)
G	Longueur de l'ouverture
L_i	Longueur de l'entaille pour les chaînes de contrôle
β	Inclinaison de la glissière
α_1	Inclinaison de la cheminée
α_2	Inclinaison du plancher de la cheminée

Les particules sont générées dans la partie verticale de la cheminée (L_g) et tombent en chute libre de manière à reproduire le phénomène de compaction. La largeur de l'ouverture de la chute (D_o) est établie en fixant E , l'épaisseur des murs de la chute en relation avec R , la dimension de la cheminée. La hauteur de l'ouverture de la chute (H_o) est obtenue en fixant L_m , la hauteur de la poutre de tête.

3.4.3 Calibration du modèle

La propriété macroscopique principale influençant la formation d'enchevêtrements rocheux lors du transfert du matériau grossier dans les chutes est l'angle de friction (Hambley 1987). L'emphase a donc été portée sur la calibration des micropropriétés des particules afin que les angles de friction du matériau synthétique, des parois de la cheminée et de la glissière du modèle numérique reflètent les expériences en laboratoire qui ont été effectuées afin de caractériser le matériau (calcaire concassé).

Quatre propriétés ont été retenues afin de calibrer le modèle numérique soient:

- La forme des fragments rocheux;
- La distribution granulométrique des fragments rocheux;
- L'angle de repos du matériau fragmenté;
- L'angle de friction entre le matériau fragmenté et les surfaces de glissement (dans ce cas-ci, du contreplaqué et de l'acier).

4 Résultats

4.1 Évaluation de l'efficacité des différents designs de chutes habituellement rencontrés dans l'industrie minière

Une base de données sur 89 chutes a été constituée à partir des informations obtenues dans 12 mines souterraines. L'analyse des données a permis l'évaluation de l'efficacité des différents designs de chutes habituellement rencontrés dans l'industrie minière. Cinq principaux types de chute ont été recensés et consignés dans la base de données soit:

- rideaux de chaînes montés directement dans le roc (17 observations);
- chute et rideaux de chaînes de contrôle (49 observations);
- chute, rideaux de chaînes et porte pivotante (21 observations);
- chute et porte rigide (1 observation);
- chute et Ross Feeder (1 observation).

Trois principales configurations de système chute/cheminée ont été identifiées. Dans celle la plus fréquemment rencontrée, les chutes sont situées directement au bas de la cheminée telle qu'illustrée à la Figure 4.1a. Cette configuration représente 75 % des observations dans la base de données. Dans la seconde configuration, soit 18% des observations, elles se retrouvent au bas

d'une monerie de transfert connectée à la cheminée, Figure 4.1b. La troisième configuration, avec 7% des observations, est similaire dans l'ensemble à la deuxième configuration (Figure 4.1c). La principale différence est située au niveau de la monerie de transfert qui est connectée au plancher d'une niche Alimak.

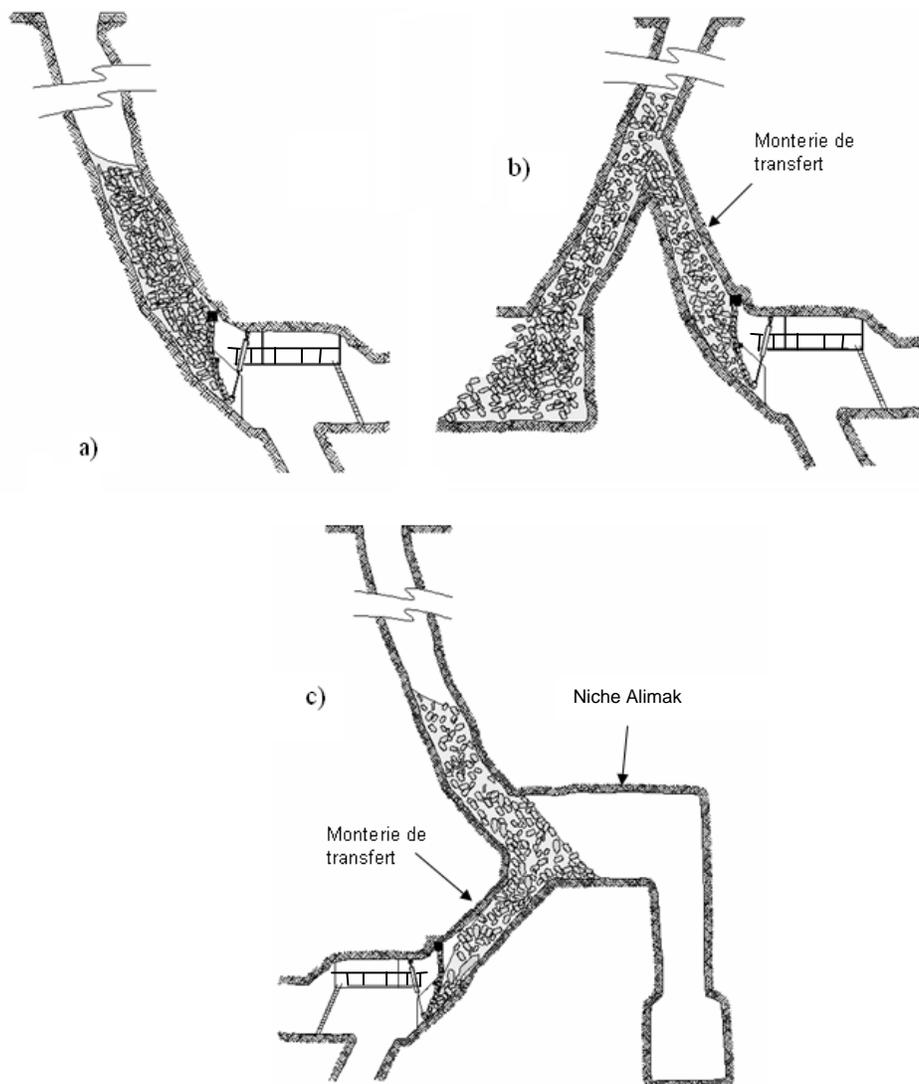


Figure 4.1. Principales configurations des systèmes chutes/cheminées rencontrés: a) configuration "typique", b) monerie de transfert connectée à la cheminée, c) monerie de transfert connectée à une niche Alimak.

4.1.1 Types de chute rencontrés

Le Tableau 4.1 présente la répartition des types de chute en fonction des systèmes chutes/cheminées recensés dans la base de données. On peut constater que la configuration la plus fréquente est une chute avec un rideau de chaînes de contrôle située directement au bas d'une cheminée. À elle seule, cette combinaison représente 51% des observations de la base de données.

Tableau 4.1. Répartition des types de chute en fonction des systèmes chutes/cheminées recensés.

Type de chute	Nombre recensé		
			
Rideau de chaînes de contrôle seulement	15	2	--
Chute et rideau de chaînes de contrôle	45	1	3
Chute, rideau de chaînes et porte pivotante	5	13	3
Chute et porte rigide	1	--	--
Chute et Ross Feeder	1	--	--
Total	67	16	6

Rideau de chaînes de contrôle directement dans le roc :

Les rideaux de chaînes de contrôle, installés directement dans le roc, représentent 17 des 89 (19%) infrastructures servant au contrôle de l'écoulement du matériau (Figure 4.2). Selon les commentaires recueillis, le seul avantage de ce type de chute est d'être très simple à construire et peu coûteux.



Figure 4.2. Chaînes de contrôle utilisées seules.

Ce type d'infrastructure n'est pas considéré comme étant efficace pour contrôler l'écoulement du matériau puisque dans la majorité des cas, le rideau de chaînes est actionné par l'entremise d'un

câble d'acier relié à un cylindre pneumatique. Cette configuration ne permet pas d'appliquer directement une poussée sur le rideau de chaînes lors de la fermeture de celui-ci. Il doit donc se refermer sous l'action de la gravité seulement. L'expérience démontre que ceci est rarement possible. L'opérateur se retrouve la plupart du temps dans l'incapacité de refermer le rideau de chaînes tant qu'il reste du matériau dans la cheminée. La cheminée est donc vidée à chaque fois que le rideau de chaînes est actionné en position ouverte. Il est donc difficile de garder un niveau de matériau prédéterminé dans la cheminée. Ceci entraîne aussi un endommagement prématuré à la poutre de tête, sur laquelle le rideau de chaînes est fixé. Il est rarement possible de protéger cette poutre en gardant un coussin de matériau dans la zone de décharge. Les commentaires recueillis des opérateurs indiquent aussi que le plancher de roc ne favorise pas l'écoulement du matériau. De plus, le mauvais ajustement entre le rideau de chaînes et l'ouverture de la cheminée ne permet généralement pas de contrôler le matériau fin.

Les chutes de ce type sont généralement jugées inefficaces. Ce type d'infrastructure ne devrait pas être utilisé dans une situation où le contrôle de l'écoulement du matériau est critique, par exemple pour le chargement d'un camion.

Chute et rideau de chaînes de contrôle

Un meilleur contrôle sur le mouvement du matériau est obtenu si le rideau de chaînes de contrôle est utilisé de concert avec une chute proprement dite (Figure 4.3). C'est le type de configuration le plus fréquemment rencontré avec 63 des 89 chutes de la base de données.



Figure 4.3. Rideau de chaînes de contrôle dans une chute, méthode d'action directe par cylindre pneumatique ou hydraulique.

Ce type de chute, lorsque bien conçu, est considéré comme efficace pour contrôler l'écoulement du matériau dans la cheminée. Deux méthodes d'action du rideau de chaînes sont habituellement rencontrées. La plus commune est l'action directe par cylindre pneumatique, telle qu'illustrée à la Figure 4.3. L'autre méthode est l'action du rideau de chaînes à l'aide d'un poussoir, lui-même actionné par un cylindre hydraulique ou pneumatique, Figure 4.4. Ces deux méthodes sont considérées comme efficaces, à condition que les cylindres utilisés puissent développer une force suffisante pour refermer le rideau de chaînes malgré le matériau en mouvement.



Figure 4.4. Rideau de chaînes de contrôle dans une chute, méthode d'action directe par un poussoir.

Les opérateurs miniers mentionnent aussi l'importance de garder un certain niveau de minéral dans le bas de la cheminée pour protéger ces infrastructures des chocs par impacts causés par le matériau. Ce type de chute permet des opérations de déblocage moins risquées que les rideaux de chaînes installés directement dans le roc, dans le cas où des passerelles de travail sont installées (Figure 4.3).

4.1.2 Configurations des systèmes chutes/cheminées

Les commentaires reçus par les opérateurs miniers ont permis d'identifier les avantages et les inconvénients pour chacune des configurations illustrées à la Figure 4.1. Ceux-ci sont présentés dans les Tableaux 4.2 à 4.3.

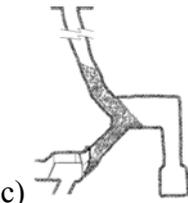
Tableau 4.2. Avantages et inconvénients des chutes localisées directement au bas des cheminées

 a)	
Avantages	Inconvénients
Configuration la plus facile à construire.	Une seule place de travail est disponible pour effectuer les opérations de déblocage.
Possibilité d'utiliser des cheminées fortement inclinées ou verticales afin de minimiser l'accumulation du matériau fin dans la zone de décharge.	Impossibilité d'utiliser la cheminée en cas de réfection des chutes.
Du point de vue géomécanique, c'est la configuration la plus stable étant donné qu'il n'y a pas d'intersection entre la cheminée et une monterie.	L'installation d'un système de monitoring du niveau de matériau est difficile pour les cheminées dont l'inclinaison est inférieure à 80°.

Tableau 4.3. Avantages et inconvénients des chutes localisées dans une monterie de transfert.

 b)	
Avantages	Inconvénients
Offre deux places de travail pour effectuer les opérations de déblocage, soit par la chute elle-même ou à partir de l'arrivée de la cheminée à minerai dans la galerie d'accès.	Les accrochages par enchevêtrements rocheux peuvent être fréquents à la jonction entre la monterie de transfert et la cheminée lorsque la monterie de transfert est de dimension inférieure à celle de la cheminée.
Le changement de direction dans l'écoulement du minerai à la monterie de transfert ralentit le matériau et protège la chute à minerai des chocs par impacts.	Dégradation possible du massif rocheux à la jonction entre la cheminée et la monterie de transfert. Cette dégradation peut être l'élément déclencheur d'une dégradation plus généralisée.
Il est possible de continuer à utiliser la cheminée lors des opérations de réfection de la chute à condition de couler une barricade de protection en béton dans la monterie de transfert.	La nécessité de laisser un pilier de roc entre la monterie de transfert et la cheminée restreint l'inclinaison de la monterie de transfert. Un angle interne de 30° ou plus entre la cheminée et la monterie de transfert devrait être maintenu.
Cette configuration est celle qui se prête le plus à l'instauration d'un système de monitoring efficace du niveau de matériau dans la cheminée. Par conséquent, cette configuration permet l'automatisation de l'ouverture et de la fermeture des chutes.	La plupart des monteries de transfert sont construites à des angles allant de 55° à 60°. Ces angles pourront causer une accumulation de matériau fin au-dessus des chutes. Il est donc fortement recommandé d'utiliser cette configuration de concert avec un système de soufflerie prévenant l'accumulation des fines. La monterie de transfert doit être suffisamment longue pour que la jonction avec la cheminée soit dans un régime d'écoulement en masse.
	Cette configuration requiert le soutirage quotidien à l'aide d'une chargeuse-navette de matériau dans le point de soutirage non contrôlé par une chute. Ceci est nécessaire afin de prévenir la compaction et la consolidation du matériau sous la monterie de transfert.

Tableau 4.4. Avantages et inconvénients des chutes localisées dans une monterie de transfert sous une niche Alimak.

 <p>c)</p>	
Avantages	Inconvénients
Le changement de direction dans l'écoulement du minerai à la monterie de transfert ralentit le matériau et protège la chute à minerai des chocs par impact.	La plupart des monteries de transfert sont construites à des angles allant de 55° à 60°. Ces angles pourront causer une accumulation de matériau fin au-dessus des chutes. Il est donc fortement recommandé d'utiliser cette configuration de concert avec un système de soufflerie prévenant l'accumulation des fines.
Cette configuration se prête relativement bien à l'instauration d'un système de monitoring du niveau de matériau dans la cheminée.	Cette configuration est de loin la plus laborieuse à réaliser.
	Les accrochages par enchevêtrements rocheux peuvent être fréquents à la jonction entre la monterie de transfert et la cheminée lorsque la monterie de transfert est de dimension inférieure à celle de la cheminée.
	Impossible d'utiliser la cheminée en cas de réfection de la chute.
	Le changement de direction rend très difficile le positionnement des charges explosives à l'aide de baguettes en cas d'accrochage dans la cheminée. L'utilisation d'un Spoutnik est aussi plus difficile.

Évaluation en fonction des résultats de la modélisation par éléments distincts.

Les résultats de la modélisation numérique ont démontré que la configuration du système chute/cheminée n'avait pas d'influence sur la dimension requise de l'ouverture de la chute. Les opérateurs miniers ont mentionné que des accrochages par enchevêtrements rocheux se produisent à la jonction de la monterie de transfert et de la cheminée dans le cas de la configuration présentée à la Figure 4.1b. Selon les résultats des modélisations numériques, les accrochages seraient évités si la monterie de transfert est de dimension égale à la cheminée et que celle-ci respecte les rapports de dimensionnement des cheminées à minerai proposés par Lessard et Hadjigeorgiou (2004).

Selon les résultats des modélisations numériques réalisées, l'influence principale des différentes configurations se situe au niveau de leur potentiel à recevoir un système efficace d'instrumentation du niveau du matériau dans les cheminées. Une chute située dans une monterie de transfert connectée à une cheminée (Figure 4.1b) va permettre l'instauration d'un système de monitoring plus efficace dans les cheminées inclinées. L'angle du minerai par rapport à l'horizontal lors de son écoulement, tel qu'illustré à la Figure 4.5a, fait en sorte qu'il est difficile d'évaluer adéquatement la hauteur du minerai dans la chute. La configuration illustrée à la Figure 4.5b permet une lecture beaucoup plus précise du niveau de matériau afin de prévenir une vidange complète de la cheminée. Dans le cas d'une cheminée verticale, les deux configurations permettront une bonne lecture du niveau du matériau.

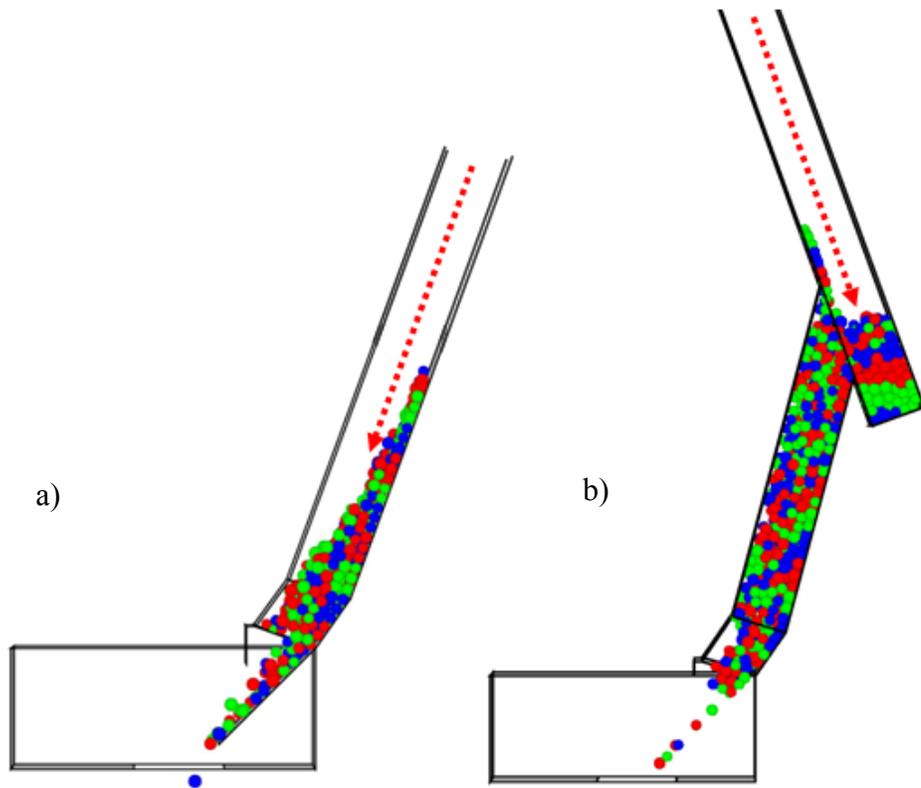


Figure 4.5. Ligne de visée d'un système laser dans une cheminée inclinée à 70°: a) configuration typique, b) monterie de déversement connectée à la cheminée.

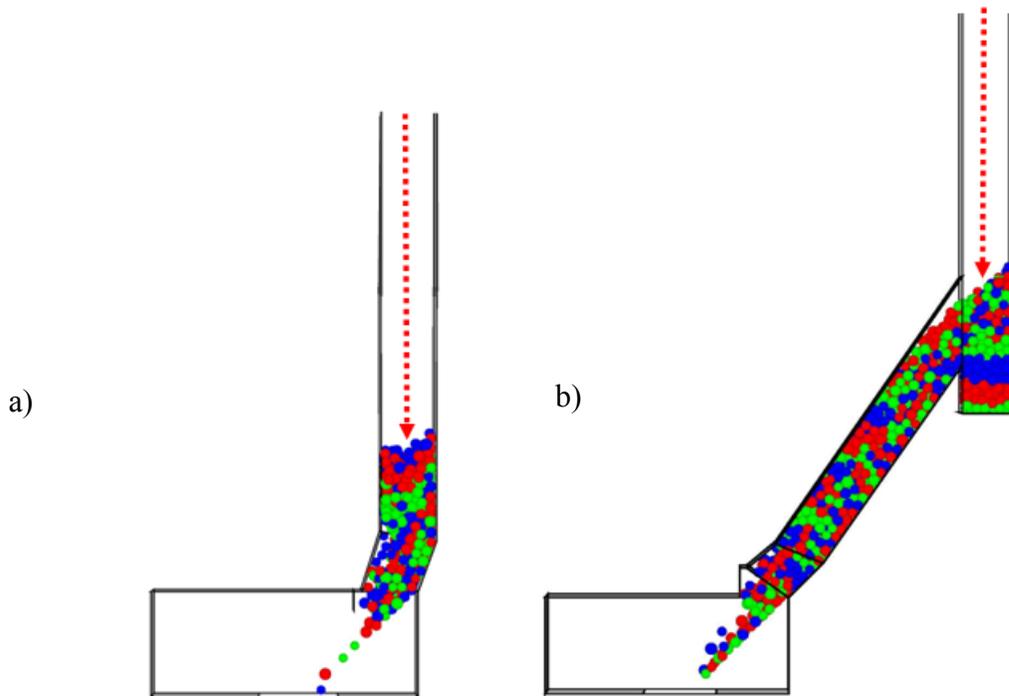


Figure 4.6. Ligne de visée d'un système laser dans une cheminée inclinée à 90°: a) configuration typique, b) monterie de déversement connectée à la cheminée.

4.2 Évaluation des règles de conception actuelles

La conception des silos et des trémies pour le stockage des matériaux en vrac est largement couverte dans la littérature. Il n'existe toutefois que très peu de littérature dédiée à la conception des chutes dans les cheminées. Hambley (1987), Ferguson (1991), Kvapil (1965), Parizeau (1966) et Beus et al. (2001) sont les principales références disponibles. Les règles proposées par ces auteurs touchent principalement quatre points soient:

- la largeur d'ouverture de la chute (D_o);
- la hauteur d'ouverture de la chute (H_o);
- l'inclinaison de la glissière de la chute;
- l'inclinaison de la cheminée.

Les règles de conception disponibles ont été évaluées en fonction des résultats observés sur le terrain. Un modèle réduit de chute et de cheminée à minerais et la modélisation numérique à l'aide d'un modèle par éléments distincts ont aussi été utilisés.

4.2.1 Dimensionnement de l'ouverture requise des chutes

L'ouverture d'une chute est habituellement caractérisée par sa largeur *minimale* (D_o) et sa hauteur *minimale* (H_o), telle qu'illustrée à la Figure 4.7.

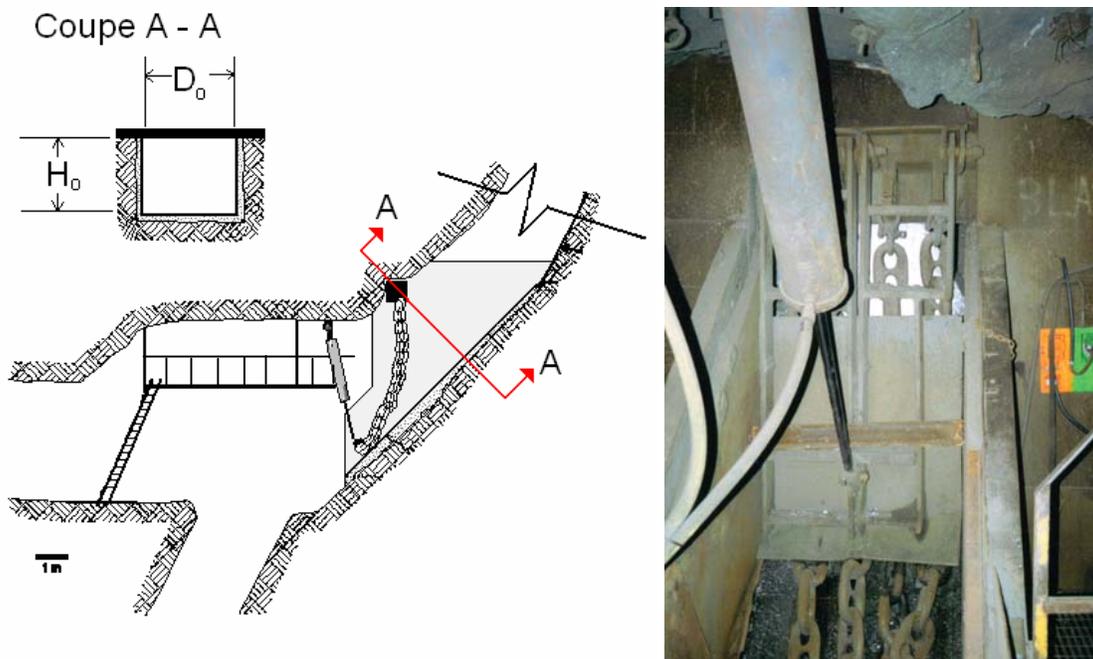


Figure 4.7. Définition de la largeur minimale (D_o) et de la hauteur minimale (H_o) d'une chute.

Deux types de blocages dans les chutes sont rencontrés soient les enchevêtrements rocheux, associés au matériau grossier et la formation d'arches cohésives, associée à la présence en quantité importante de matériau fin. La géométrie actuelle des chutes dans la base de données a

été comparée avec les règles de conception proposées dans la littérature. La base de données a donc été analysée afin de vérifier si la construction actuelle des chutes suivait les règles de conception proposées.

Le Tableau 4.5 présente la fréquence des blocages par enchevêtrements rocheux dans les chutes de la base de données. Seules les cheminées pour lesquelles aucun problème de dégradation des parois n'a été rapporté ont été considérées dans l'analyse. L'avantage d'utiliser un grizzly aux points de déversement du matériau dans les cheminées y est évident. Près de la moitié des cheminées munies de grizzly ne présente aucun problème de blocage dans les chutes. Aucune cheminée munie d'un grizzly ne présente de blocages fréquents (i.e. plus d'une occurrence par semaine). À l'inverse, seule une section de cheminée n'étant pas munie de grizzly ne présente aucun problème alors que la majorité des sections démontre une forte occurrence (plus de 1 blocage par semaine).

Tableau 4.5. Nombre de sections de cheminées en fonction de la fréquence de blocages par enchevêtrements rocheux dans les chutes.

Fréquence des blocages	Sections munies d'un grizzly	Sections sans grizzly
Aucun	24	1
Occasionnels (moins de 1 par semaine)	26	8
Fréquents (plus de 1 par semaine)	0	27
Total des sections	50	36

Le Tableau 4.6 présente la fréquence des blocages causés par la formation d'arches cohésives. La majorité des chutes (70%) rencontre ce type de problème occasionnellement ou fréquemment.

Tableau 4.6. Fréquence des blocages par formation d'arches cohésives dans les chutes.

Fréquence des blocages	Sections avec ou sans grizzly
Aucun	26
Occasionnels (moins de 1 par semaine)	40
Fréquents (plus de 1 par semaine)	20
Total des sections	86

Les blocages par arches cohésives sont minimaux lorsque le matériau ne contient pas de fines ou encore lorsque la mine dispose d'un système de soufflerie pour nettoyer les chutes ou amorcer le mouvement du matériau lors de l'ouverture des chaînes de contrôle.

4.2.1.1 Prévention des enchevêtrements rocheux

Hambley (1987), Kvapil (1965), Parizeau (1966) et Beus et al. (2001) ont proposé des règles de conception des chutes pour les cheminées à minerai pour prévenir les blocages par enchevêtrements rocheux. L'ensemble de ces règles relie la largeur d'ouverture requise (D_o) à la grosseur des fragments rocheux (d). Le Tableau 4.7 présente les différents rapports D_o/d proposés. Si la définition de l'ouverture requise (D_o) est similaire pour tous les auteurs, la définition de la grosseur des fragments rocheux (d) varie d'un auteur à l'autre. D'un point de vue pratique, ceci rend difficile l'application des règles de dimensionnement préconisées.

Tableau 4.7. Rapport entre la largeur (D_o) d'ouverture requise et la dimension des fragments rocheux (d).

Source	Ratio D_o/d minimum requis	Définition de la dimension des fragments rocheux (d)
Kvapil (1965)	3.8 à 6	Diamètre moyen des fragments rocheux
Parizeau (1966)	3.6 à 4.5	Diamètre des fragments rocheux
Hambley (1987)	3	Dimension des plus gros fragments rocheux ou de l'ouverture de la maille d'un grizzly
Beus et al. (2001)	5	Dimension des plus gros fragments rocheux ou de l'ouverture de la maille d'un grizzly

Peele (1947), Kvapil (1965) et Parizeau (1966) définissent "d" en tant que diamètre des fragments rocheux. Cette définition pose certains problèmes du point de vue pratique. La notion de diamètre implique que les fragments rocheux soient sphériques ou, du moins, équidimensionnels. Peele (1947) propose d'utiliser le diamètre maximal des plus gros fragments rocheux. Kvapil (1965) propose d'utiliser le diamètre moyen des fragments rocheux tandis que Parizeau (1966) n'apporte aucune précision. Hambley (1987) et Beus et al. (2001) définissent "d", comme la dimension des plus gros fragments rocheux sans toutefois spécifier s'il s'agit de la dimension maximale ou intermédiaire (respectivement L et B dans la Figure 3.3). des plus gros fragments rocheux.

Dans tous les cas, l'évaluation de ces dimensions peut s'avérer difficile. De plus, la fragmentation peut varier grandement d'un chantier à l'autre selon le patron de sautage utilisé, la géologie rencontrée, etc. À défaut d'évaluer la dimension maximale des plus gros fragments rocheux, Hambley (1987) et Beus et al. (2001) proposent d'utiliser la dimension des mailles d'un grizzly pour estimer la taille des particules pouvant être déversées dans une cheminée (Figure 4.8).

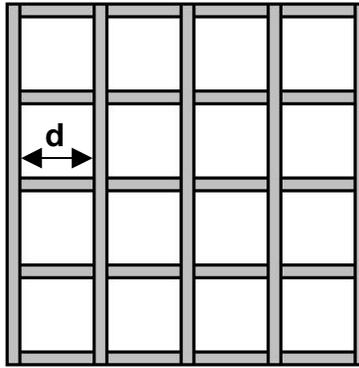


Figure 4.8. Définition de "d" en fonction des mailles d'un grizzly.

L'estimation de la dimension des fragments par la maille d'un grizzly présente de nombreux avantages. Cette méthode est facilement applicable et n'est pas sujette à interprétation. Ses résultats sont indépendants de la forme des fragments rocheux et de la variation de la fragmentation d'un chantier à l'autre.

Pour la plupart des règles disponibles, la hauteur d'ouverture des chutes (H_o) est habituellement considérée comme égale à D_o . Le Tableau 4.8 présente la hauteur d'ouverture requise selon les différentes sources. Kvapil (1965), Pariseau (1966) et Beus et al. (2001) ont considéré le cas d'une ouverture carrée ou $H_o = D_o$. Hambley (1987) en se basant sur des travaux antérieurs et sur son expérience propose des ouvertures rectangulaires avec $H_o \geq 0.8 D_o$.

Tableau 4.8. Hauteur d'ouverture requise (H_o) des chutes.

Source	Hauteur d'ouverture requise
Kvapil (1965)	$H_o = D_o$
Pariseau (1966)	$H_o = D_o$
Hambley (1987)	$H_o \geq 0.8 D_o$
Beus et al. (2001)	$H_o = D_o$

Évaluation en fonction des données de terrain.

La largeur d'ouverture des chutes D_o dans la base de données a été comparée avec les règles suggérées par Hambley (1987) et Beus et al. (2001). Compte tenu de la difficulté d'évaluer la dimension des particules facilement et sans ambiguïté, seules les sections munies de grizzly ont été considérées. La dimension "d" des particules pouvant être déversées dans la cheminée est exprimée en fonction de l'ouverture des mailles d'un grizzly. Les résultats sont présentés à la Figure 4.9.

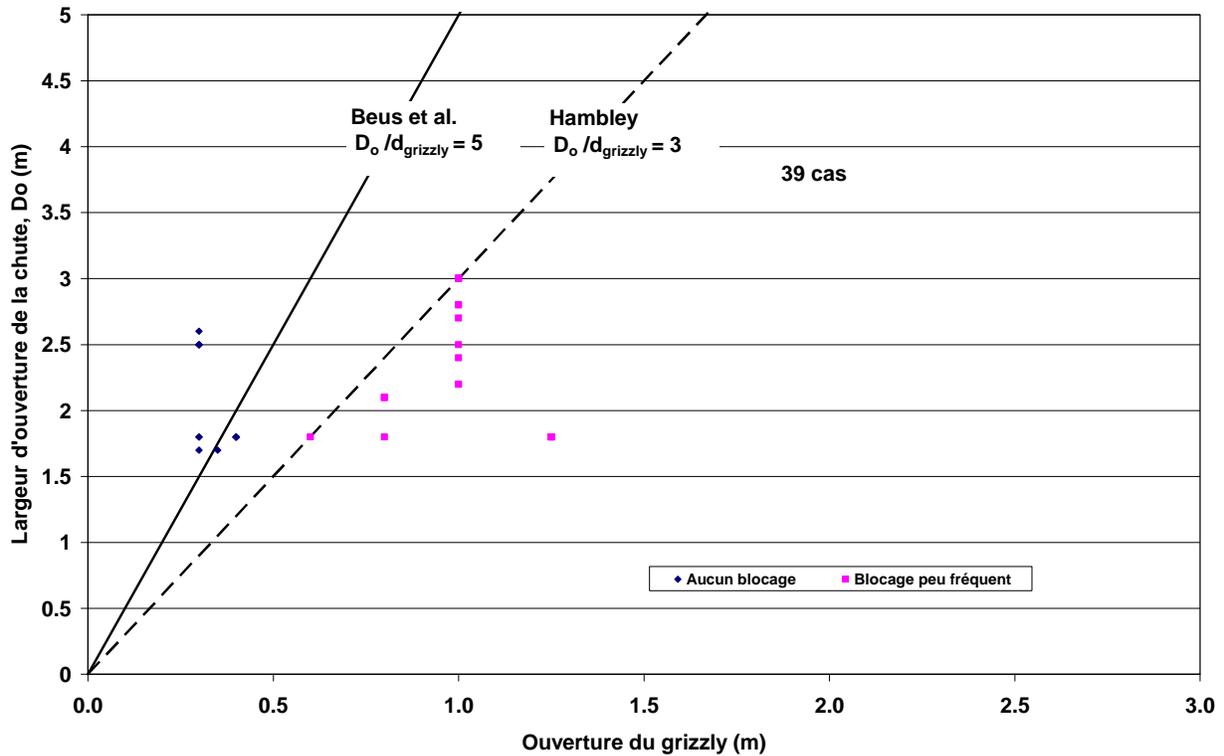


Figure 4.9. Présence de blocages en fonction du rapport des ouvertures chute/grizzly ($D_o/d_{grizzly}$) suggéré par Hambley (1987) et Beus et al. (2001), (cheminées munies de grizzly seulement).

On peut constater que les rapports suggérés par Hambley (1987) et Beus et al. (2001) semblent assurer un écoulement libre selon les données de terrain. Sur la figure 4.9 on ne retrouve toutefois que très peu de données démontrant un rapport $D_o/d_{grizzly}$ compris entre 3 et 5.

Évaluation en fonction des résultats de laboratoire à l'aide d'un modèle réduit.

Les tests en laboratoire à l'aide d'un modèle réduit ont permis d'évaluer les dimensions requises de l'ouverture des chutes pour assurer un écoulement libre dans le cas de trois matériaux ayant différentes distributions granulométriques.

Pour tous les matériaux, les plus grandes particules pouvaient passer un tamis ayant une ouverture de 26 mm mais étaient retenues sur un tamis de 19 mm. La dimension maximale des particules était donc identique d'un matériau à l'autre. Seule l'étendue de la distribution granulométrique changeait. Le Tableau 4.9 présente les résultats obtenus.

Les résultats obtenus indiquent que, outre la dimension des particules, l'étendue de la distribution granulométrique est le principal facteur influençant la dimension requise pour l'ouverture de la chute. L'inclinaison de la chute de même que l'inclinaison de la cheminée ne semblent pas jouer de rôle significatif sur la dimension d'ouverture requise. Ces facteurs vont toutefois jouer un rôle

sur le nombre de blocages recensé dans l'éventualité où l'ouverture de la chute n'est pas suffisante pour assurer un écoulement libre.

Lors des tests effectués, il est apparu qu'une distribution bien étalée requiert une dimension d'ouverture inférieure comparativement à une distribution peu étalée ou une distribution uniforme. Dans le cas des matériaux A et C, un écoulement libre était possible pour une largeur d'ouverture (D_o) de 10 cm. La hauteur d'ouverture (H_o) requise était de 6 cm pour le matériau A (distribution bien étalée) et 10 cm pour le matériau C (distribution peu étalée). Pour le matériau B (distribution uniforme), une largeur et une hauteur d'ouverture de 12 cm et 10 cm respectivement étaient requises.

Tableau 4.9. Dimension de l'ouverture requise du modèle réduit pour assurer un écoulement libre (cas d'un matériau sec) en fonction de d_{max} , d_{moy} et $d_{grizzly}$.

Type de distribution	D_o requis (cm)	H_o requis (cm)	H_o/D_o	D_o/d_{max}	D_o/d_{moy}	$D_o/d_{grizzly}$
Uniforme (matériau B)	12	10	0.8	2.35	3.42	4.70
Peu étalée (matériau C)	10	10	1.0	1.96	2.85	3.94
Bien étalée (matériau A)	10	6	0.6	1.96	2.85	3.94
				$d_{max} = 5.11$ cm	$d_{moy} = 3.58$ cm	$d_{grizzly} = 2.54$ cm

Afin d'être conséquent avec la plupart des travaux effectués à ce jour, les dimensions d'ouverture requises ont été exprimées dans le Tableau 4.9 en fonction de la dimension des particules. À cet effet, trois dimensions de référence ont été retenues:

- d_{max} , la longueur des plus grosses particules de la distribution, soit les particules retenues sur un tamis de 19.1 mm;
- d_{moy} , la largeur des plus grosses particules de la distribution, soit les particules retenues sur un tamis de 19.1 mm;
- $d_{grizzly}$, la dimension du tamis laissant passer les plus grosses particules de la distribution, soit un tamis de 25.4 mm.

Pour un même matériau, les résultats des différents ratios varient du simple au double dépendamment de la définition de la dimension des particules. Par exemple pour le matériau C, D_o/d_{max} est égal à 1.96 et $D_o/d_{grizzly}$ est égal à 3.94. Ceci illustre bien l'importance de bien définir la dimension des particules lors de l'élaboration ou lors de l'utilisation de tels ratios.

Dans la pratique, il est préférable de prendre en considération une variation de la distribution granulométrique. La distribution granulométrique du matériau déversé dans les cheminées peut varier d'un godet de chargeuse-navette à l'autre. Une conception conservatrice devrait considérer la possibilité que le matériau soit parfois de distribution uniforme. Considérant ceci, la dimension requise pour la largeur de la chute, D_o , devrait être:

$D_o \geq 4.7 d_{\text{grizzly}}$ (ou d_{grizzly} = maille d'un grizzly).

La hauteur d'ouverture de la chute, H_o , devrait être:

$$H_o \geq 0.8 D_o$$

L'utilisation de ces ratios devrait minimiser grandement la possibilité d'occurrence de blocages par enchevêtrements rocheux dans les chutes.

Évaluation en fonction des résultats de la modélisation par éléments distincts.

Des simulations numériques ont été réalisées afin de vérifier si les dimensions d'ouverture requise pour prévenir les blocages par enchevêtrements rocheux établies à l'aide d'un modèle réduit pouvaient être extrapolées à une combinaison cheminée/chute en grandeur réelle.

La distribution granulométrique des fragments rocheux simulés est présentée à la Figure 4.10. La distribution granulométrique simulée correspond à un matériau de distribution uniforme ($C_u = 1.8$). Une distribution uniforme a été retenue puisque que cette distribution requiert une ouverture plus grande que dans le cas d'un matériau de distribution bien étalée. La forme des fragments rocheux simulés est illustrée à la Figure 4.11. Les fragments dont la dimension intermédiaire était inférieure 0.15 m étaient représentés par des sphères afin de réduire les temps requis pour le calcul.

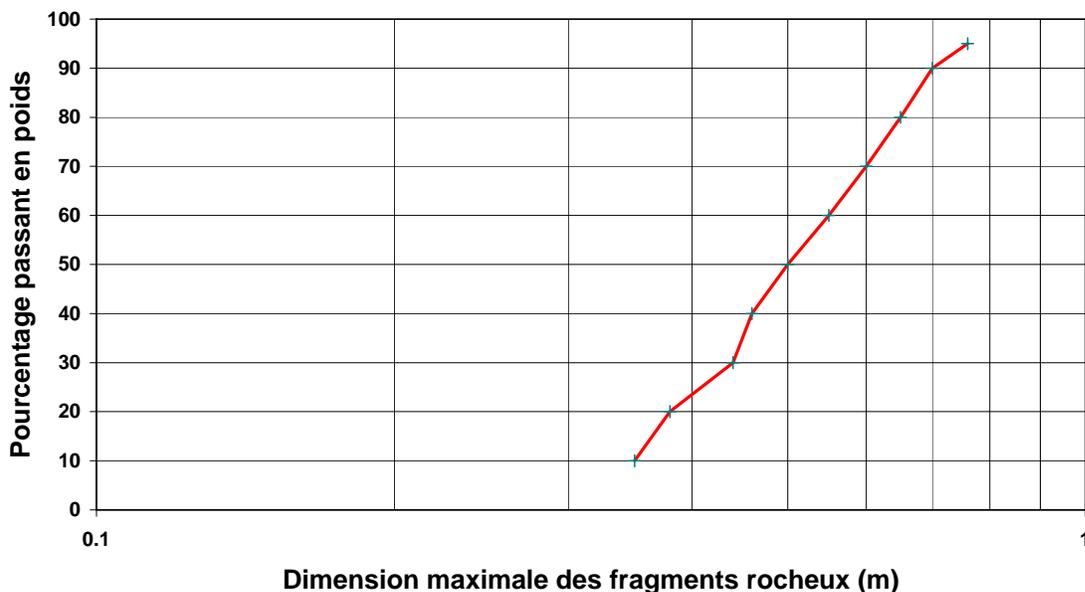


Figure 4.10. Distribution granulométrique du matériau simulé.

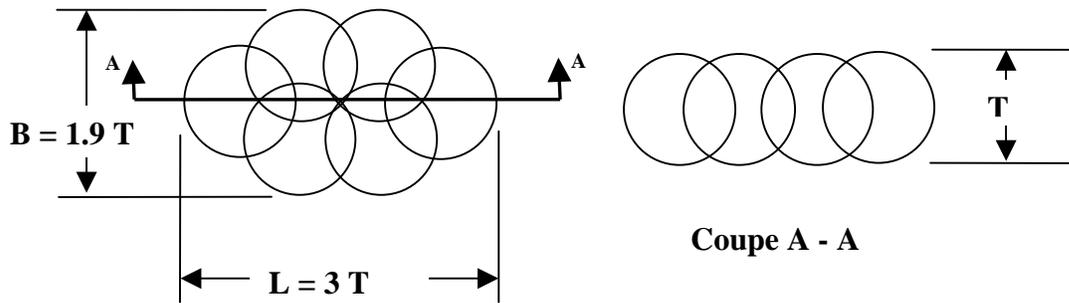


Figure 4.11. Forme des fragments rocheux simulés.

Deux inclinaisons de cheminée (60° et 80°) et deux inclinaisons de glissière (35° et 45°) ont été simulées, pour un total de quatre modèles de système chute/cheminée. Les configurations simulées de même que les résultats observés sont présentés dans le Tableau 4.10. Un écoulement libre a été obtenu pour l'ensemble des simulations effectuées. Les simulations confirment l'applicabilité à plus grande échelle des rapports $D_o/d_{grizzly}$ ou D_o/d_{max} obtenus à l'aide des essais avec le modèle réduit.

Tableau 4.10. Configurations simulées et résultats observés

Configuration de la cheminée et de la chute	Résultats observés dans la chute	Résultats observés dans la cheminée
Angle de la cheminée: 80° Angle du plancher de la cheminée: 70° Angle de la glissière: 45° D: 2.1 m D_o : 1.8 m H_o : 1.5 m $d_{grizzly}$: 0.38 m d_{max} : 0.76 m	$D_o/d_{grizzly} = 4.7$ $D_o/d_{max} = 2.4$ $H_o/D_o = 0.8$ Écoulement libre dans la chute	Écoulement libre dans la cheminée $D/d_{grizzly} : 5.5$ $D/d_{max} : 2.8$
Angle de la cheminée: 80° Angle du plancher de la cheminée: 70° Angle de la glissière: 35° D: 2.1 m D_o : 1.8 m H_o : 1.5 m $d_{grizzly}$: 0.38 m d_{max} : 0.76 m	$D_o/d_{grizzly} = 4.7$ $D_o/d_{max} = 2.4$ $H_o/D_o = 0.8$ Écoulement libre dans la chute	Écoulement libre dans la cheminée $D/d_{grizzly} : 5.5$ $D/d_{max} : 2.8$

Angle de la cheminée: 60° Angle du plancher de la cheminée: 50° Angle de la glissière: 45° D: 2.1 m D _o : 1.8 m H _o : 1.5 m d _{grizzly} : 0.38 m d _{max} : 0.76 m	$D_o/d_{grizzly} = 4.7$ $D_o/d_{max} = 2.4$ $H_o/D_o = 0.8$ Écoulement libre dans la chute	Écoulement libre dans la cheminée $D/d_{grizzly} : 5.5$ $D/d_{max} : 2.8$
Angle de la cheminée: 60° Angle du plancher de la cheminée: 50° Angle de la glissière: 35° D: 2.1 m D _o : 1.8 m H _o : 1.5 m d _{grizzly} : 0.38 m d _{max} : 0.76 m	$D_o/d_{grizzly} = 4.7$ $D_o/d_{max} = 2.4$ $H_o/D_o = 0.8$ Écoulement libre dans la chute	Écoulement libre dans la cheminée $D/d_{grizzly} : 5.5$ $D/d_{max} : 2.8$

4.2.1.2 Prévention des arches cohésives

Les arches cohésives sont le résultat de la cohésion exhibée par le matériau fin (Hambley et al. 1983). Généralement, les règles de classification des sols (ASTM D-411 et D-653, AASHTO T-88 et USCS) définissent les fines comme les matériaux silteux et argileux soit la portion passant 0.07 mm. Dans le cas de la manutention des matériaux, cette définition du matériau fin est plus arbitraire. Kvapil (1965) définit le matériau cohésif en accord avec les classifications des sols, soit passant 0.07mm. Jenike (1961) définit le matériau fin dans le cas de la manutention des matériaux comme celui passant 0.25 mm (tamis no. 65).

Il est peu probable que le matériau provenant des sautages soit majoritairement constitué de matériau inférieur à 0.25 mm, encore moins inférieur à 0.07 mm. Toutefois le comportement du matériau est fortement influencé par sa proportion de matériau fin. Kvapil (1965) suggère 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 matériau égale à 10% en poids entraîne un comportement cohésif du matériau. 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 matériau fin.

La proportion de matériau fin peut augmenter entre le soutirage dans les chantiers et la zone de décharge des cheminées. Premièrement, il existe un phénomène de ségrégation naturelle des fines vers la zone de décharge des cheminées à minéral. Ensuite, plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité de fines produites durant les opérations de manutention tels que: la résistance du matériau, la distance de transport dans les cheminées, le niveau de matériau dans celles-ci, de même que leur mode de gestion (maintenir vide ou pleine). Il est difficile d'évaluer exactement l'ampleur de ce phénomène.

Hambley (1987) propose la relation analytique suivante afin d'évaluer la dimension minimale d'une cheminée à minerai verticale ou de l'ouverture d'une chute afin de prévenir la formation d'arches cohésives:

$$D > 2C_o \cos\phi / \gamma \quad \text{équation 4.1.}$$

- D = largeur minimum de l'ouverture de la chute (m)
 C_o = résistance en compression uniaxiale des fines (kPa)
 γ = poids volumique des fines (kN/m³)

L'équation peut aussi être exprimée en fonction de la cohésion des fines:

$$D > (4c / \gamma) (1 + \sin \phi) \quad \text{équation 4.2.}$$

Où:

- D = largeur minimum de l'ouverture de la chute (m)
 c = cohésion des fines (kPa)
 γ = poids volumique des fines (kN/m³)
 φ = angle de friction interne des fines (degrés)

Évaluation en fonction des données de terrain.

Hadjigeorgiou et Lessard (2004) ont effectué des essais de cisaillement direct sur des minerais provenant de trois mines souterraines. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.11.

Tableau 4.11a. Cohésion (c) et angle de friction (φ) de 3 minerais pour différents teneurs en eau, d'après Hadjigeorgiou et Lessard (2004).

Teneur en eau	4%		8%		12%	
	c (kPa)	φ (degrés)	c (kPa)	φ (degrés)	c (kPa)	φ (degrés)
Mine A	9.5	40.1	9.8	41.7	4.5	41.9
Mine B	10.1	34.8	11.0	35.1	4.6	37.5
Mine C	11.7	39.7	8.2	42.6	5.5	42.0

Tableau 4.12b. Type et porosité de 3 minerais, d'après Hadjigeorgiou et Lessard (2004).

	Minerai	Porosité
Mine A	Sulfures	0.36
Mine B	Sulfures	0.33
Mine C	Andésite minéralisée	0.36

La Figure 4.12a illustre les distributions granulométriques caractérisant les minerais des trois mines. Les résultats de cohésion obtenus ont été placés en graphique dans la Figure 4.13b en fonction de la gamme des dimensions d'ouverture minimale des chutes observées dans les trois mines souterraines. La droite sur chacun des graphiques illustre l'ouverture minimale de la chute requise afin de prévenir les arches cohésives. Le poids volumique et l'angle de friction typique de chacun des minerais ont été portés dans l'équation 4.2 afin de tracer chacune des droites.

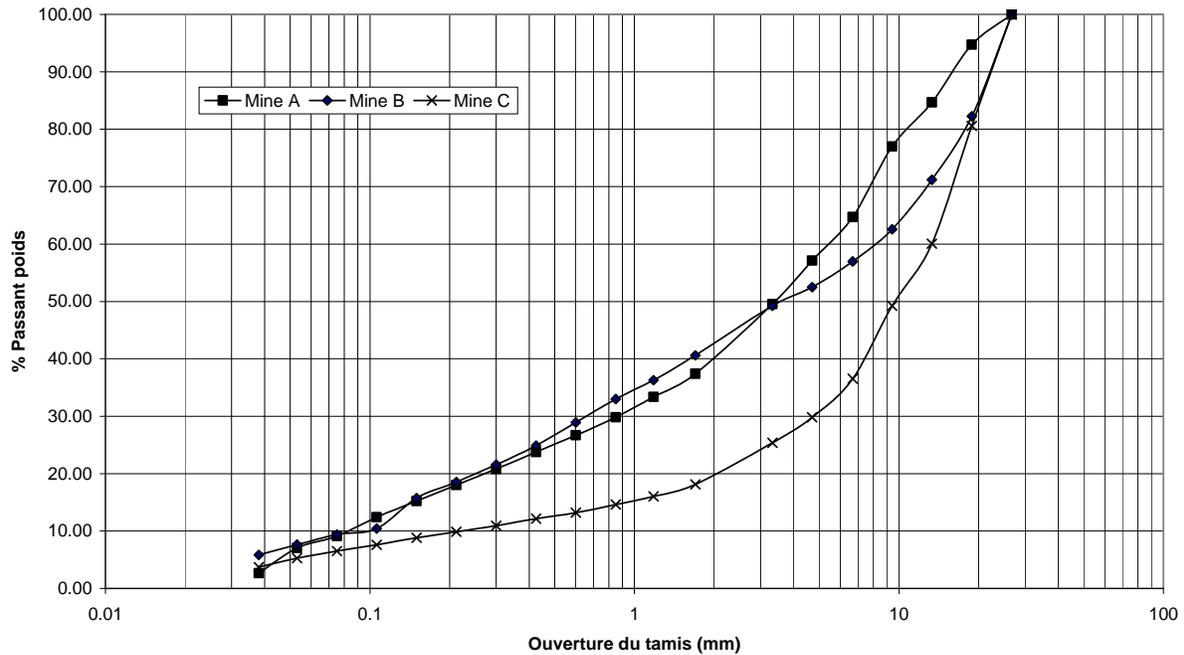
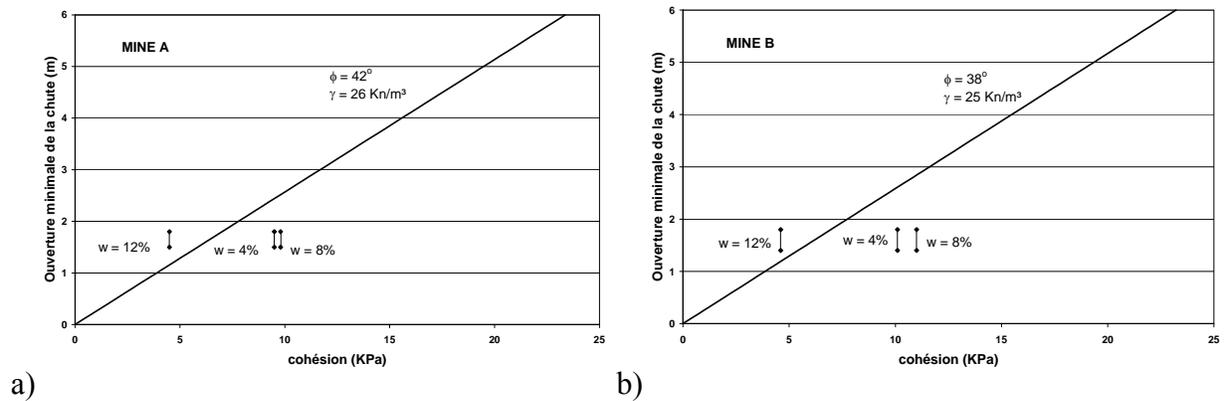


Figure 4.12a. Distributions granulométriques caractérisant les minerais des trois mines.



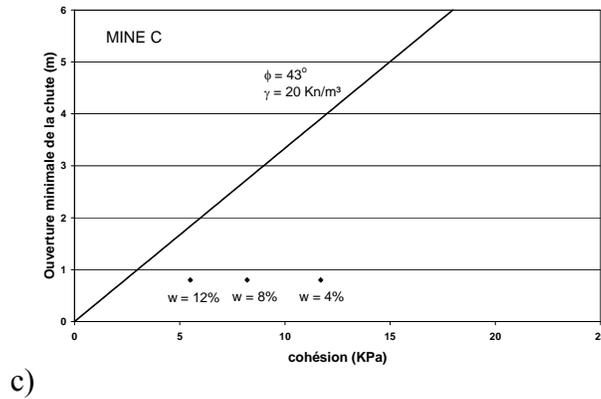


Figure 4.13b. Données de terrain en fonction de l'ouverture requise de la chute selon Hambley (1987).

Il est possible de constater que pour l'ensemble des mines, des teneurs en eau de 4% à 8% entraînent la formation d'arches cohésives, à condition que la proportion de fines dans le minerai soit suffisante. Dans 2 des 3 mines, une teneur en eau de 12% réduira suffisamment la cohésion pour empêcher la formation d'arches cohésives. Par contre, une teneur en eau de 12% augmente significativement le risque de générer des coulées de boue.

Le Tableau 4.13 présente les ouvertures requises selon l'équation 4.2 pour des teneurs en eau de 4% et 8% pour les mines A, B et C. La gamme d'ouvertures minimales des chutes utilisées à la mine, de même que la fréquence rapportée d'arches cohésives dans les chutes y sont aussi présentées.

Tableau 4.13. Ouverture requise pour différentes teneurs en eau, ouvertures utilisées et occurrence de blocages par arches cohésives.

Mine	γ kN/m ³	ϕ (°)	w = 4%		w = 8%		Gamme d'ouvertures utilisées (m)	Occurrence d'arches cohésives
			c (kPa)	ouverture requis (m)	c (kPa)	ouverture requis (m)		
A	26	42	9.5	2.4	9.8	2.5	1.5 – 1.8	Fréquente
B	25	38	10.1	2.6	11.0	2.8	1.4 – 1.8	Fréquente
C	20	43	11.7	3.9	8.2	2.8	0.8	Jamais

La cohésion mesurée à des teneurs en eau similaires à celles rencontrées dans les mines souterraines (4% à 8%) indique que les dimensions d'ouvertures typiques ne suffisent pas à assurer un écoulement lors de l'ouverture des chutes si la proportion de fines dans le minerai est trop grande. Cette condition n'est pas toujours rencontrée. Par exemple, la mine C ne rapporte aucune formation d'arche cohésive bien que l'ouverture minimale utilisée soit très en deçà de l'ouverture requise.

Évaluation en fonction des résultats de laboratoire à l'aide d'un modèle réduit.

Une série de tests effectués sur le matériau A (0-3/4") a été réalisée à des teneurs en eau différentes, soit 4% et 6%. Tel qu'indiqué dans la section 3.3.1, ce matériau comporte 10% poids de particules passant 0.25 mm. Par conséquent, ce matériau est susceptible de former des arches cohésives.

Dans toutes les configurations de chutes testées, il n'a pas été possible de prévenir la formation d'arches cohésives. Le matériau ne s'écoulait pas lors de l'ouverture initiale de la porte de la chute au moment des soutirages. Par contre, aucun autre blocage n'était observé après que le matériau soit en mouvement. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.14. Pour fin de comparaison, les résultats obtenus lors des essais sur un matériau sec sont présentés à nouveau.

Tableau 4.14. Résultats obtenus.

teneur en eau	D _o (cm)	H _o (cm)	Résultats
0%	10	6	• Aucun blocage observé
4%	10	6	• Blocages systématiques lors de l'ouverture de la porte pour soutirer le matériau
4%	12	7.2	
6%	12	7.2	• Aucun blocage durant l'écoulement du matériau

Les résultats semblent indiquer qu'il n'est pas possible de prévenir la formation d'arches cohésives lors de l'ouverture de la porte. Ceci est principalement dû à la compaction du minerai dans le bas de la chute puisque le modèle physique était entièrement vidé à chaque essai. Dans une cheminée, le même phénomène de compaction dans les chutes peut être observé si le niveau du minerai est gardé très bas. Dans le cas où celui-ci reste immobile pour des périodes de temps plus ou moins prolongées, un phénomène de consolidation est observé.

L'ouverture requise pour prévenir la formation de blocages par enchevêtrements rocheux devrait donc être suffisante pour empêcher la formation d'arches cohésives uniquement dans le cas où le matériau est en mouvement. Il ne semble pas possible d'avoir une ouverture de chute suffisamment grande pour permettre l'écoulement libre du matériau si la proportion de fines est telle qu'elle permet la formation d'arches cohésives.

Évaluation en fonction des résultats de la modélisation par éléments distincts.

Un modèle numérique 2D utilisant les éléments distincts, PFC2D, a été utilisé afin de simuler l'écoulement d'un matériau cohésif. Un modèle générique de chute à minerai a été utilisé. Les fragments rocheux ont été simulés comme étant circulaires. La cohésion du matériau a été obtenue en créant des liens de cimentation entre les particules (i.e. l'option "parallel bonding" dans PFC2D). La méthodologie utilisée pour calibrer le modèle est décrite dans Iverson (2002).

Un total de 16 simulations numériques a été effectué. Le Tableau 4.15 présente les configurations simulées, la cohésion du matériau simulé et les résultats obtenus. La Figure 4.14 présente un exemple d'arche cohésive obtenue dans une chute à minerai.

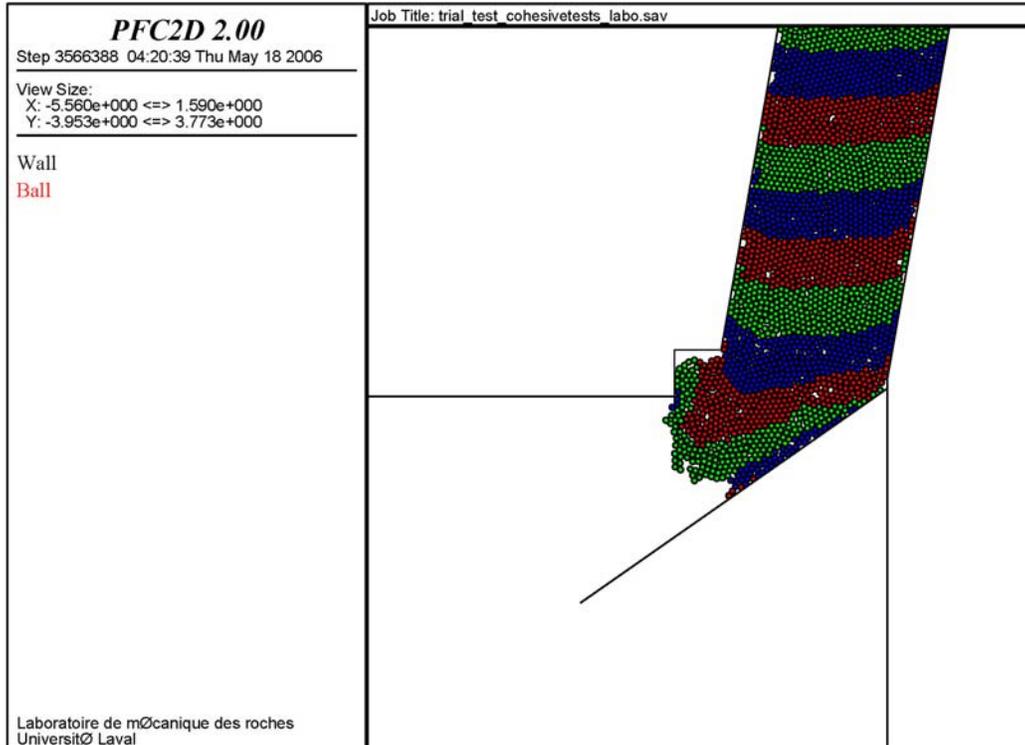


Figure 4.14. Exemple d'arche cohésive obtenue à l'aide de PFC2D.

Tableau 4.15. Configurations des simulations numériques à l'aide de PFC2D et résultats obtenus

Configuration du système chute / cheminée	H_0	Poids volumique du matériau simulé	Angle de friction du matériau simulé	Cohésion du matériau simulé	Résultats obtenus
Inclinaison de la cheminée = 60° Inclinaison de la glissière = 35°	1 m	27 kN/m ³	45°	1.3 kPa	Écoulement libre
				2.5 kPa	Écoulement libre
				3.7 kPa	Écoulement libre
				5.5 kPa	Arche cohésive
Inclinaison de la cheminée = 60° Inclinaison de la glissière = 45°	1 m	27 kN/m ³	45°	1.3 kPa	Écoulement libre
				2.5 kPa	Écoulement libre
				3.7 kPa	Écoulement libre
				5.5 kPa	Arche cohésive
Inclinaison de la cheminée = 80° Inclinaison de la glissière = 35°	1 m	27 kN/m ³	45°	1.3 kPa	Écoulement libre
				2.5 kPa	Écoulement libre
				3.7 kPa	Écoulement libre
				5.5 kPa	Arche cohésive
Inclinaison de la cheminée = 80° Inclinaison de la glissière = 45°	1 m	27 kN/m ³	45°	1.3 kPa	Écoulement libre
				2.5 kPa	Écoulement libre
				3.7 kPa	Écoulement libre
				5.5 kPa	Arche cohésive

La Figure 4.15 présente une comparaison entre les résultats obtenus pour les simulations numériques et ceux prédits par l'équation 4.2. On peut constater que les résultats de la modélisation numérique sont en accord avec la solution analytique proposée par Hambley 1987.

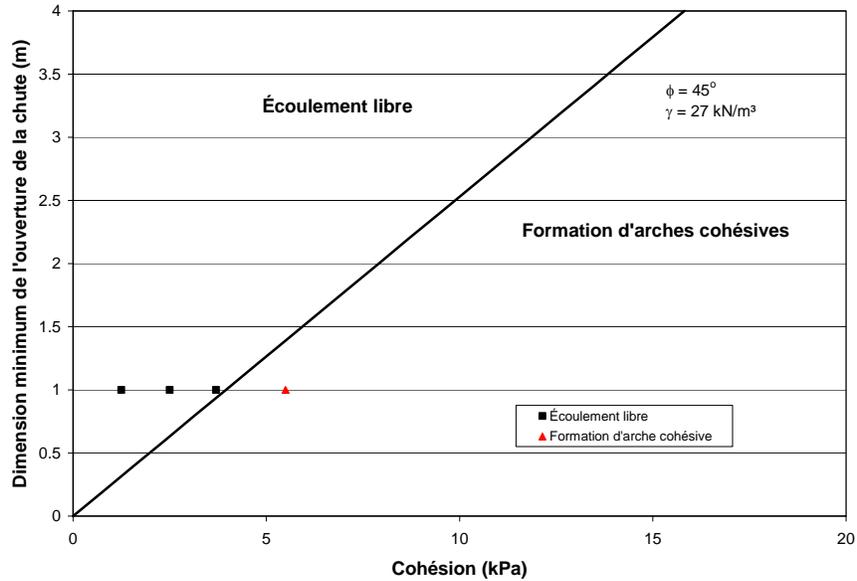


Figure 4.15. Comparaison entre les résultats prédits par l'équation 4.2 et ceux obtenus à l'aide de PFC2D.

4.2.2 Inclinaison de la glissière des chutes

Hambley (1987) mentionne que l'expérience montre que l'inclinaison des chutes varie entre 30° et 45° . Il propose toutefois d'utiliser des inclinaisons de glissière de 40° à 45° lors de la conception des chutes. Ferguson (1991) suggère de concevoir l'inclinaison de la glissière en fonction de la nature du minerai tel qu'indiquée dans le Tableau 4.16.

Tableau 4.16. Inclinaison de la glissière, selon Ferguson (1991)

Nature du minerai	Inclinaison de la glissière
Humide	35°
Sec	40°
Cohésif	45°

Évaluation en fonction des données de terrain.

L'analyse des données de terrain n'a pas permis de mettre en valeur une relation claire entre l'inclinaison de la glissière et l'occurrence des blocages, comme en témoigne le Tableau 4.17. Les données de terrain semblent indiquer que si l'ouverture de la chute est suffisante, l'inclinaison de la glissière n'a pas d'influence significative sur l'occurrence des blocages par enchevêtrements rocheux.

Tableau 4.17. Influence de l'inclinaison de la glissière sur la fréquence des blocages par enchevêtrements rocheux.

Inclinaison de la glissière	Total	Fréquence des blocages par enchevêtrements rocheux		
		Aucun	Peu fréquent	Fréquent
30° - 34°	5	0	5	0
35° - 39°	5	3	2	0
40° - 44°	21	7	13	1
≥ 45°	19	1	5	13
Plancher horizontal (rock box)	25	8	3	14

Évaluation en fonction des résultats de laboratoire à l'aide d'un modèle réduit.

Cette faible relation se manifeste aussi sur la base des résultats des tests effectués à l'aide d'un modèle physique. Tant l'analyse des données de terrain que les résultats des tests à l'aide d'un modèle physique démontrent que le facteur prépondérant dans l'occurrence des blocages par enchevêtrements rocheux est le rapport entre la largeur d'ouverture de la chute et la dimension des fragments rocheux.

Le Tableau 4.18 présente le nombre de blocages obtenu pour les différentes combinaisons d'inclinaison de glissière et de cheminée testées. Aucun blocage n'ayant été enregistré pour le matériau A (0-3/4"), les blocages recensés ont été obtenus lors des tests avec les matériaux B (3/4") et C (1/2"-3/4").

Les inclinaisons de glissière testées étaient de 35°, 40° et 45°. Selon les résultats des tests, toutes ces inclinaisons étaient suffisamment prononcées pour que le matériau y glisse. Les résultats obtenus permettent de démontrer une certaine relation entre l'inclinaison de la glissière et le nombre de blocages dans la zone de décharge d'une cheminée dans le cas où la dimension des chutes ne permet pas un écoulement libre. Le plus grand pourcentage de blocages (47%) a été obtenu dans le cas d'une inclinaison de glissière de 35° comparativement à des pourcentages de blocages de 26% et 27% pour des inclinaisons de glissière de 40° et 45° respectivement. Il est important de mentionner que l'inclinaison de la glissière n'a pas d'influence observable sur la dimension requise de l'ouverture de la chute. Par contre, elle semble influencer le nombre de blocages observés dans le cas où l'ouverture de la chute est sous-dimensionnée.

Tableau 4.18. Nombre de blocages obtenus dans la chute du modèle physique pour les 3 matériaux testés (matériaux secs).

Angle de la cheminée (β)	Angle de la glissière (α)		
	35°	40°	45°
60°	31	13	21
70°	34	17	19
80°	19	15	7
Nombre total de blocages selon l'inclinaison de la glissière	84 (47% des blocages)	45 (26% des blocages)	47 (27% des blocages)

L'influence de la glissière, dans le cas d'un matériau humide contenant des fines, est plus facilement observable. À l'instar d'un matériau sec, l'inclinaison de la glissière, dans le cas d'un matériau humide, ne semble pas avoir d'influence sur la dimension de l'ouverture requise pour avoir un écoulement libre. Par contre, lors des tests, il est apparu que l'effort requis pour amorcer le mouvement du matériau était moindre pour des inclinaisons de glissière de 45° mesuré par rapport à l'horizontale. Une telle inclinaison réduit la compaction du matériau, particulièrement dans le cas où la cheminée est inclinée à 80° ou plus.

L'influence de l'inclinaison de la glissière a été évaluée pour le cas d'un matériau sec et d'un matériau humide. Les inclinaisons requises sont présentées en fonction du pourcentage de fines et de l'humidité du matériau. Il est à noter qu'un matériau grossier, c'est-à-dire un matériau contenant moins de 10% poids de particules passant 0.25 mm, est peu susceptible de retenir l'humidité.

Tableau 4.19. Inclinaisons suggérées pour la glissière en fonction des résultats du modèle physique.

Pourcentage de fines	Matériau sec	Matériau humide
< 10% 0.25 mm	$\geq 35^\circ$	$\geq 35^\circ$
> 10% 0.25 mm	$\geq 35^\circ$	= 45°

Évaluation en fonction des résultats de la modélisation par éléments distincts.

Les simulations numériques effectuées démontrent que le facteur prépondérant dans l'occurrence des blocages par enchevêtrements rocheux est le rapport entre la largeur d'ouverture de la chute et la dimension des fragments rocheux. Selon les résultats, une inclinaison supérieure à 35 degrés est suffisante dans le cas d'un matériau grossier pour éviter l'enchevêtrement.

4.2.3 Inclinaison des cheminées.

Le Tableau 4.20 présente les inclinaisons de cheminées suggérées selon différentes sources. Il ne semble pas exister de consensus dans la littérature quant à l'inclinaison des cheminées. Il est possible de constater des divergences importantes entre, par exemple, Peele (1947) qui propose les cheminées verticales comme étant préférables et Emmerich (1992) pour qui 60° devrait être l'inclinaison maximale afin de minimiser la compaction du matériau.

Tableau 4.20. Inclinaison suggérée pour les cheminées à minerai.

Source	Inclinaison suggérée
Peele (1947)	Préférentiellement 90°
Kvapil (1965)	Typiquement plus de 70° Plus de 80° pour un minerai comportant une proportion de fines importante
Hambley (1987)	Typiquement plus de 60° Plus de 75° pour un minerai comportant une proportion de fines importantes
Ferguson (1991)	Entre 60° et 75°
Emmerich (1992)	Maximum 60°
Blight and Haak (1994)	Maximum de 70°
Stacey & Swart (1997)	Plus de 60°
Hagan & Acheampong (1999)	Entre 60° et 70°
de la Vergne (2003)	Plus de 50° pour des sections courtes Plus de 55° pour des sections longues

Seuls Kvapil (1965) et Hambley (1987) tiennent compte de la présence de fines. Ces auteurs suggèrent l'utilisation de cheminées plus inclinées dans le cas où une proportion importante du minerai transporté est composée de fines. L'expérience, de même que les tests réalisés en laboratoire, démontrent que l'inclinaison de la cheminée a une forte influence sur le type d'écoulement rencontré.

Évaluation en fonction des données de terrain.

L'analyse des données de terrain a démontré une forte influence de l'inclinaison de la cheminée sur l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon dans le bas de la cheminée. Au point de vue pratique, la zone d'écoulement en bouchon devrait être minimisée. La présence d'une telle zone restreint le canal d'écoulement au-dessus des chutes et peut entraîner une accumulation de minerai fin dans le bas des cheminées. Selon les interviews menées auprès des opérateurs miniers, la majorité des problèmes d'accumulation de fines dans le bas des cheminées sont rencontrés dans les cheminées où l'inclinaison est inférieure à 80°. Les problèmes d'écoulement causés par l'accumulation de fines sont habituellement rencontrés dans les cheminées dont l'inclinaison varie entre 50° et 70°.

L'utilisation de cheminées fortement inclinées (pendage $> 80^\circ$) entraîne toutefois une plus grande compaction du matériau lorsque le niveau de celui-ci est bas. Si le niveau de matériau n'est pas suffisamment élevé, la compaction du matériau dans la chute peut-être assez grande pour empêcher l'écoulement lors de l'ouverture de la chute. Le maintien d'un "coussin" de matériau dans le bas des cheminées permet de prévenir la compaction du matériau dans les chutes. Beus et al. (1999) ont mesuré que les impacts dynamiques sur les chutes devenaient négligeables après le déversement de cinq godets de chargeuse-navette. Ceci semble indiquer qu'un "coussin" de matériau équivalent à 5 ou 6 godets de chargeuse-navette devrait être suffisant pour réduire la compaction du matériau dans les chutes. Dans le cas d'une cheminée typique de 1.8 m x 1.8 m, un "coussin" de matériau équivalent à 5 ou 6 godets de 6 m³ devrait être suffisant pour réduire la compaction du matériau dans les chutes.

Évaluation en fonction des résultats de laboratoire à l'aide d'un modèle réduit.

Les résultats des tests ont démontré une très forte influence de l'inclinaison de la cheminée sur l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon à la base de la cheminée, restreignant ainsi l'aire effective d'écoulement (Figure 4.16).



Figure 4.16. Matériau passif dans la zone d'écoulement en bouchon: matériau A, cheminée inclinée à 60° après soutirage du 1er tiers.

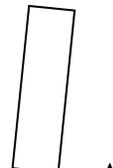
Dans le cas d'un matériau sec, ce matériau passif peut rester en place une fois la cheminée vidée ou s'effondrer. Dans le cas du matériau A humide, une colonne de matériau, correspondant sensiblement au matériau passif dans la zone d'écoulement en bouchon, restait systématiquement en place une fois la cheminée vidée.

Le Tableau 4.21 présente les résultats obtenus. L'influence prépondérante de l'inclinaison de la cheminée est évidente. Plus la cheminée est inclinée, moins importante est la zone d'écoulement en bouchon. La dimension de l'ouverture des chutes (D_o et H_o) ne semble pas avoir d'influence sur l'étendue de la zone du matériau passif.

Les résultats du Tableau 4.21 démontrent aussi une influence importante de la distribution granulométrique du matériau sur l'étendue de la zone de matériau passif. Plus la distribution est étalée, plus l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon est importante. Dans le cas du matériau A, équivalent à une distribution bien étalée, la longueur de la cheminée était trop courte pour identifier le début de la zone, celle-ci apparaissant dès le début de l'écoulement.

Ces résultats sont très significatifs, car le matériau passif, associé à un écoulement en bouchon, restreint la surface effective d'écoulement du matériau. Idéalement, cette zone devrait être minimisée le plus possible. En pratique, comme l'étendue de la distribution granulométrique est variable, l'utilisation de cheminées fortement inclinées (inclinaison $\geq 80^\circ$) semble donc être la solution la plus efficace pour arriver à cette fin.

Tableau 4.21. Étendue de la zone d'écoulement en bouchon (cas d'un matériau sec).

Angle de la cheminée (β)	Type de matériau		
	matériau A (0-3/4") <i>distribution bien étalée</i>	matériau B (3/4") <i>distribution uniforme</i>	matériau C (1/2"-3/4") <i>distribution peu étalée</i>
60°	 Dès le début de l'écoulement ($> 8D$)	 3e tiers (= 2D)	 1e tiers (= 6D)
70°	 1er tiers (= 6D)	 3e tiers (= 2D)	 2e tiers (= 4D)
80°	 3e tiers (= 2D)	 Aucune visible	 Aucune visible

Le Tableau 4.22 présente l'influence de l'inclinaison de la cheminée sur l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon dans le cas du matériau A sec et avec des taux d'humidité de 4% et 6%. Encore ici, l'influence de l'inclinaison de la cheminée sur l'étendue de cette zone est significative, bien que moins importante que dans le cas d'un matériau sec.

Les résultats du Tableau 4.22 démontrent une légère influence du taux d'humidité sur l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon dans le cas des cheminées inclinées à 70° et 80°. Pour une inclinaison de 70°, la longueur de la cheminée était trop courte pour identifier le début de la zone d'écoulement en bouchon dans le cas de matériaux avec des teneurs en eau de 4% et 6%. Pour une inclinaison de 60°, la longueur de la cheminée était trop courte pour identifier le début de cette zone quelque soit la teneur en eau. Dans le cas d'une cheminée inclinée à 80°, l'étendue de la zone d'écoulement en bouchon la plus importante a été observée pour une teneur en eau de 4%.

Tableau 4.22. Étendue de la zone d'écoulement en bouchon (cas du matériau A humide)

Angle de la cheminée (β)	matériau A (0-3/4")		
	matériau sec	teneur en eau 4%	teneur en eau 6%
60°	 Dès le début de l'écoulement	 Dès le début de l'écoulement	 Dès le début de l'écoulement
70°	 1er tiers	 Dès le début de l'écoulement	 Dès le début de l'écoulement
80°	 3e tiers	 1er tiers	 2e tiers

Dans le cas du matériau humide pour des teneurs en eau de 4% et 6%, une colonne de matériau restait en place à la fin du soutirage (Figure 4.17). Dans la plupart des cas, la hauteur de cette colonne de matériau restant correspondait au matériau passif dans la zone d'écoulement en bouchon.



Figure 4.17. Exemple de colonne de matériau restant en place à la fin du soutirage, a) vue de face, b) vue de haut.

4.3 Développement d'outils de travail pratiques pour les ingénieurs miniers

Ce projet de recherche a permis de développer des outils de travail pour les ingénieurs miniers afin de les assister lors de la conception des chutes à minerais.

4.3.1 Élaboration d'un guide de conception.

L'analyse de la base de données ainsi que les travaux de modélisations numériques et l'utilisation d'un modèle réduit ont permis d'élaborer un guide de conception des chutes à minerais. La Figure 4.18 présente les facteurs à considérer et les règles directrices préconisées lors de la conception tel qu'indiqué dans le guide.

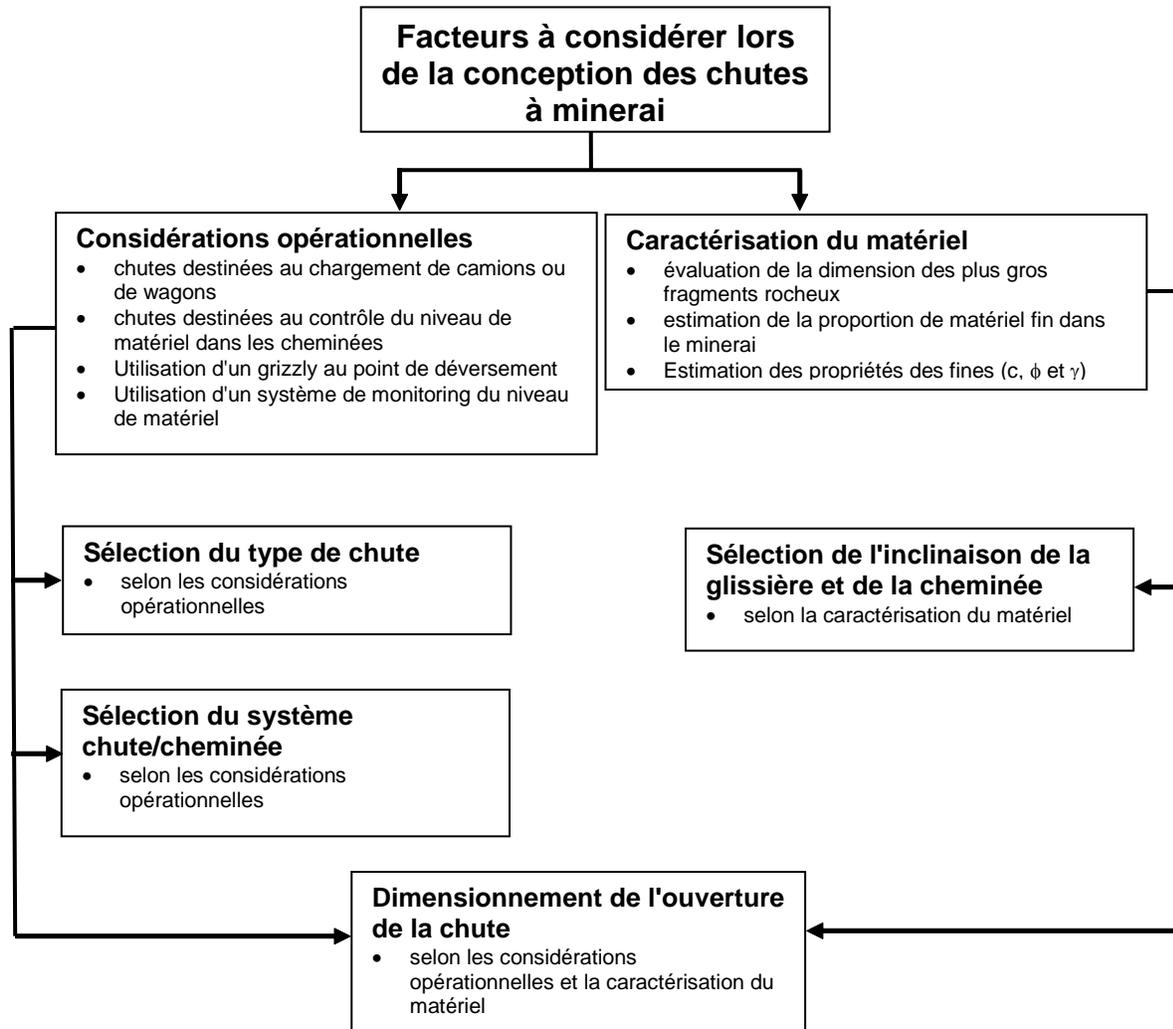


Figure 4.18. Méthodologie de conception des chutes à minerai.

4.3.2 Élaboration de modèles numériques permettant d'évaluer l'écoulement du matériau.

Trois différents modèles numériques ont été réalisés afin d'évaluer l'influence de la géométrie d'une chute sur l'écoulement du matériau, Figure 4.19. Ces modèles ont été développés de manière à ce que l'utilisateur puisse modifier facilement la configuration, la forme de fragments rocheux de même que la distribution granulométrique du matériau.

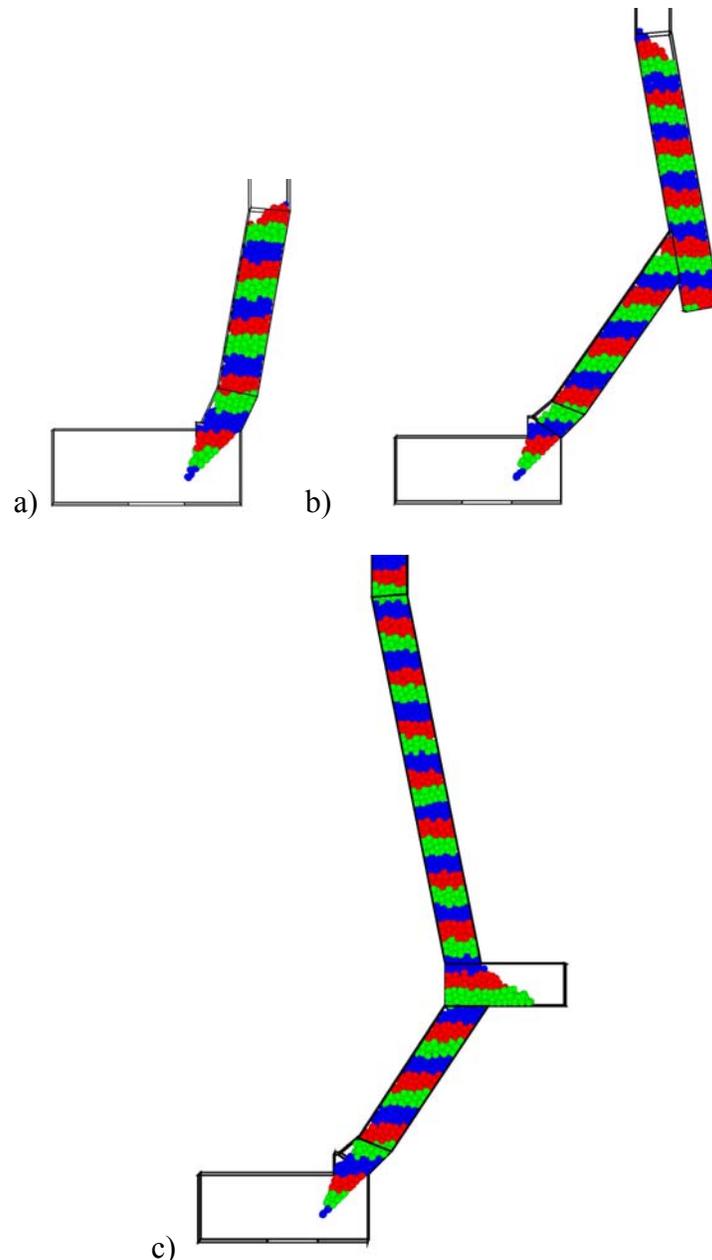


Figure 4.19. Modèles numériques développés: a) système chute/cheminée typique, b) chute dans une monterie de transfert connectée à la cheminée, c) chute dans une monterie de transfert connectée à une niche Alimak.

5 Discussion des résultats

Ce projet est l'étude canadienne sur le dimensionnement des chutes à minerai la plus complète à avoir été réalisée. La collaboration des mines souterraines québécoises témoigne de l'intérêt généré par ces travaux.

Les données de terrain obtenues ont permis d'évaluer les règles directrices requises à la

conception des chutes à minerai. L'écoulement du matériau a été analysé à l'aide d'un modèle réduit et de modélisations numériques. L'influence de la dimension de l'ouverture de la chute et de la distribution granulométrique des fragments rocheux sur l'occurrence de la formation de blocages a été étudiée en détail. L'influence de l'inclinaison de la glissière et de la cheminée sur l'étendue de la zone de matériau passif a aussi été évaluée.

La méthodologie utilisée au cours de ce projet de recherche comporte certaines limites. L'analyse des données de terrain a été effectuée en fonction des commentaires recueillis dans les mines visitées auprès du personnel des services d'ingénierie, de production et de santé sécurité. Il s'est avéré que les réponses obtenues pouvaient varier d'un interlocuteur à l'autre. Ceci s'explique par les facteurs suivants :

- Manque de communication entre les différents départements (ingénierie, production, santé-sécurité)
- Généralement peu de données sont compilées sur les activités n'ayant pas un lien direct avec la production de minerai (par exemple les activités de déblocages des chutes).
- Interlocuteurs parfois peu familiers avec le système de manutention étant donné le taux élevé de roulement du personnel dans l'industrie minière.

L'utilisation d'un modèle réduit peut introduire un phénomène de distorsion. Dans le cas d'un matériau granulaire non cohésif, l'angle de friction est le principal facteur en jeu dans l'occurrence des blocages. Ce facteur étant adimensionnel, il est peu sensible à l'effet de distorsion.

L'utilisation de la modélisation numérique par éléments distincts est très exigeante en temps de calcul, ce qui limite grandement son utilisation. Trois facteurs influencent le temps de calcul requis, le nombre de particules, leur taille et l'ordre de grandeur des coefficients de rigidité. Il n'est pas vraiment possible de simuler des distributions granulométriques étendues reflétant celles rencontrées sur le terrain. Le nombre élevé de particules de petite taille rendrait les simulations beaucoup trop longues à réaliser. Actuellement la vitesse des CPU ne permet pas de réaliser un grand nombre de simulations en trois dimensions.

Les résultats de cette recherche ont été présentés dans un document distinct accessible aux opérateurs miniers. Ce document, Guide de conception des chutes à minerai (Hadjigeorgiou & Lessard, 2007), est disponible auprès de l'IRSST.

6 Conclusion

Le rôle des chutes à minerai est d'assurer un transfert ininterrompu du matériau. Ceci exige une conception assurant un écoulement du minerai en tout temps.

L'expérience a toutefois montré que les chutes à minerai sont l'objet de fréquents problèmes de blocages. Le déversement du minerai contribue aussi à la détérioration des chutes, engendrant des impacts à la poutre de tête. Les problèmes opérationnels liés à l'utilisation des cheminées ont des conséquences sur la sécurité des travailleurs.

Ce projet de recherche a permis l'élaboration d'un guide de conception des chutes à minerai. Les règles de conception proposées dans le guide sont, en partie, basées sur l'analyse d'une base de données comportant 89 chutes à minerai provenant de 12 mines souterraines québécoises. Ce guide, à l'attention des ingénieurs miniers, fournit les outils de conception permettant :

- de dimensionner adéquatement les chutes à minerai afin d'éviter les problèmes de blocages par enchevêtrements rocheux;
- de choisir des stratégies visant à minimiser la possibilité de formation d'arches cohésives;
- de concevoir les cheminées de manière à diminuer l'étendue de la zone de matériau passif à la base des cheminées;
- de sélectionner le système chute/cheminée le plus adéquat selon les besoins.

6.1 Dimensionnement requise pour l'ouverture de la chute

L'ouverture de la chute devrait idéalement être suffisante pour prévenir les blocages par enchevêtrements rocheux et la formation d'arches cohésives. Les travaux effectués ont pu démontrer qu'il est possible de dimensionner adéquatement les chutes pour prévenir les blocages par enchevêtrements rocheux. Par contre, il ne semble pas possible de faire de même pour prévenir la formation d'arches cohésives dans le cas où la proportion de matériau fin est telle que celui-ci se comporte entièrement comme un matériau cohésif.

6.1.1 Dimensionnement requis pour prévenir les enchevêtrements rocheux

Les règles de dimensionnement relient la largeur d'ouverture requise de la chute (D_o) à la grosseur des fragments rocheux (d). La définition de l'ouverture requise (D_o) est similaire pour tous les auteurs. Par contre, la définition de la grosseur des fragments rocheux varie d'un auteur à l'autre. De plus, la fragmentation peut varier grandement d'un chantier à l'autre selon le patron de sautage utilisé, la géologie rencontrée, etc. D'un point de vue pratique, ceci compromet l'application de ces règles. À défaut d'évaluer la dimension maximale des plus gros fragments rocheux, Hambley (1987) et Beus et al. (2001) proposent d'utiliser la dimension des mailles d'un grizzly pour estimer " d ". Cette méthode d'évaluation de " d " lève toute ambiguïté et doit être retenue.

L'analyse des données de terrain, les travaux de modélisations numériques ainsi que les essais de laboratoire à l'aide d'un modèle réduit indiquent que la dimension requise pour un écoulement libre du matériau grossier est indépendante des inclinaisons de la cheminée et de la glissière de la chute. Les travaux ont aussi démontré une forte influence de la distribution granulométrique sur l'ouverture requise. Une plus grande ouverture est requise dans le cas d'un matériau de distribution granulométrique uniforme. Dans la pratique, la distribution granulométrique du matériau déversé dans les cheminées peut varier d'un godet de chargeuse-navette à l'autre. Une conception conservatrice devrait considérer la possibilité que le matériau soit parfois de distribution uniforme. Considérant ceci, la dimension requise pour la largeur de la chute, D_o , devrait être:

$$D_o \geq 4.7 d_{\text{grizzly}} \text{ (ou } d_{\text{grizzly}} = \text{ maille d'un grizzly)}$$

La hauteur d'ouverture de la chute, H_o , devrait être:

$$H_o \geq 0.8 D_o$$

L'utilisation de ces ratios devrait minimiser grandement la possibilité d'occurrence de blocages par enchevêtrements rocheux dans les chutes.

6.1.2 Dimensionnement requis pour prévenir la formation d'arches cohésives

Il s'est avéré que la relation suivante, suggérée par Hambley et al. (1987), semble être efficace pour prévenir la formation d'arches cohésives :

$$D > (4c / \gamma) (1 + \sin \phi)$$

Où:

D = largeur minimum de l'ouverture de la chute (m)

c = cohésion des fines (kPa)

γ = poids volumique des fines (kN/m³)

ϕ = angle de friction interne des fines (degrés)

Dans les cas où la proportion de fines dans le matériau est faible (< 10% poids de matériau passant 0.25 mm), la formation d'arches cohésives est peu probable, quelle que soit la dimension de l'ouverture de la chute. Si la proportion de matériau fin est élevée (> 10% poids de matériau passant 0.25 mm), la formation d'arches cohésives est probable.

Pratiquement, pour des valeurs de cohésion des fines telles que rencontrées dans les mines souterraines québécoises, la dimension requise est trop importante pour être envisageable. Considérant ceci, il est important d'implanter une gestion stricte dans l'opération des cheminées afin de minimiser les conditions prévalentes à la formation d'arches cohésives. Un niveau de minerai bas dans la cheminée, de même qu'un soutirage fréquent dans la chute vont réduire la consolidation des fines. Si la proportion de matériau fin est importante, il est plutôt suggéré d'utiliser un système de soufflerie ou de glissière vibrante. Ces systèmes permettent de défaire facilement les arches cohésives tout en minimisant l'utilisation d'eau.

6.2 Applicabilité des résultats

Les règles de conception des chutes à minerai proposées sont applicables de façon générale à l'ensemble des mines. Toutefois, ces règles devraient être utilisées avec certaines réserves dans le cas des mines où le minerai a tendance à s'oxyder dans les cheminées. Par ailleurs, les mines répertoriées dans la base de données se caractérisent par l'absence de problèmes critiques dus à l'oxydation du matériau. Ce phénomène peut causer une cimentation des fragments rocheux les uns aux autres, augmentant ainsi la dimension des fragments rocheux en cours de transfert dans

les cheminées. Conséquemment, les règles relatives au dimensionnement de l'ouverture de la chute peuvent donc être invalides dans ce cas.

6.3 Retombées éventuelles

Cette étude et le guide qui en résulte offrent à l'industrie des mines souterraines de nouveaux outils de conception des chutes à minerai, ce qui devrait réduire l'aspect intuitif trop souvent présent lors de leur conception. Un dimensionnement adéquat de l'ouverture des chutes réduira l'occurrence de blocages par enchevêtrements rocheux. L'implantation des stratégies visant à mieux gérer le minerai comportant une forte proportion de matériau fin devrait aussi réduire l'occurrence d'arches cohésives et permettre une diminution dans la quantité d'eau utilisée afin de défaire ces arches. Ces actions contribueront également à réduire les risques et à assurer une meilleure sécurité pour les travailleurs.

7 Références

Beauchamp Luc (Association ontarienne de sécurité au travail – secteur minier), communication personnelle (1999).

Beus M.J., Pariseau W.G., Stewart B.M. & Iverson S.R. Design of Ore Passes. in : *Underground Mining Methods*, SME, Chapter 71, 627-634 (2001)

Beus M.J., Iverson S.R., Dreschler A. & Scott V. Static and Dynamic Loads in Ore and Waste Rock Passes in Underground Mines. *Proceedings of the 37th U.S. Rock Mech. Symp.*, Vail, Colorado, 489-495 (1999).

Blight G.E. & Haak B.G. Tests on model underground ore passes. *Bulk Solids Handling* **14 :1**, p 77-81 (1994)

de la Vergne, J. *Hard Rock Miner's Handbook*. 3rd ed. McIntosh Engineering. 314 p. (2003).

Emmerich S.H. Report on Rockpass Problems in Anglo American Corporation Gold Division Mines. *Proc. Symp. on Orepasses and Combustible Materials Underground Ass. Min. Managers S. Afr.*, 83-111 (1992).

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

Hadjigeorgiou J. & Lessard J.F. Conception des cheminées à minerai et à stérile. IRSST, Rapport no R-380. 24 p. (2004).

Hadjigeorgiou J. & Lessard J.F. Guide de conception des chutes à minerai (2007)

Hagan T.O. & Acheampong E. Current Design, Support and Maintenance of Rockpasses and Assesment of Practices Applicable at Depth. *Proceedings of the 2nd Southern African Rock*

Engineering Symposium, Johannesburg, Afrique du Sud, 13-15 septembre, 62-79 (1999).

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

Itasca Consulting Group. PFC3D User's Guide (1999).

Iverson S.R., Investigation of Bulk Solids Engineering Properties and Application of PFC2D to Ore Pass Flow Problem. (2002).

Jenike A.W. Gravity Flow of Bulk Solids Bulletin No. 108. The University of Utah, Salt Lake City, UT, USA (1961).

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).

Lessard J.F. & J. Hadjigeorgiou (2006). Ore Pass Database: Quebec Underground Metal Mines. Canadian Institute of Mining Bulletin. March/April 2006.

Lessard J.F & Hadjigeorgiou J. Guide de conception des cheminées à minerai et à stérile. IRSST, Rapport no A-380. 23p. (2004).

Pariseau W.G. The Gravity Induced Movement of Materials in Ore Passes Analyzed As a Problem in Coulomb Plasticity. Ph.D. Thesis University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA (1966).

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).