UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS GÉOMÉCANIQUES DES BARRICADES ROCHEUSES ET DES CHANTIERS MINIERS REMBLAYÉS EN VUE DE LEUR ANALYSE DE STABILITÉ

LOUIS-PHILIPPE GÉLINAS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 2017

© Louis-Philippe Gélinas, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Ce mémoire intitulé :

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS GÉOMÉCANIQUES DES BARRICADES ROCHEUSES ET DES CHANTIERS MINIERS REMBLAYÉS EN VUE DE LEUR ANALYSE DE STABILITÉ

présenté par : GÉLINAS Louis-Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de : Maitrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CHAPUIS P. Robert, D. Sc. A., président

M. BELEM Tikou, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. MBONIMPA Mamert, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. MAQSOUD Abdelkabir, Ph. D., membre

DÉDICACE

À ma famille

REMERCIEMENTS

Je tiens à souligner l'apport exceptionnel de nombreuses personnes sans qui la réalisation de ce projet de recherche n'aurait jamais été possible. Tikou Belem qui a été un motivateur, un mentor et généralement beaucoup plus qu'un directeur de maitrise. Je tiens à remercier Édith Lafontaine et Vincent Dagenais, ingénieurs chez Agnico Eagle division La Ronde, pour l'aide précieuse lors de la réalisation de ce projet. Une mention toute spéciale à Ronald Thibault, technicien expert en remblai en pâte cimenté (RPC), sans qui la réalisation technique de l'instrumentation d'un chantier de RPC souterrain n'aurait jamais pu être possible. Yann Gunzburger, Thomas Hauquin, Christophe Auvray, Faneva et tous les autres de l'École des Mines de Nancy, des experts en modélisation et toujours souriants. Patrick Bernèche et toute l'équipe technique de l'URSTM pour leur support technique dans les laboratoires de l'UQAT. Je veux aussi remercier l'Institut de Recherche en Mines et Environnement UQAT-Polytechnique et au programme de bourse BMP-FQRNT-CRSNG pour le coup de main logistique et financier. Un merci tout spécial à Louise Labbé, probablement l'un des atouts le plus précieux de cette organisation et Mamert Mbonimpa pour ses nombreux conseils.

Je me dois de souligner l'apport spécial de mon ami et associé d'école par excellence Vincent Boulanger-Martel, collègue de longue date, qui est le premier responsable de m'avoir entrainé dans ce défi gigantesque qu'était de réaliser ce projet de maitrise.

La dernière et non la moindre : Gabrielle Cornellier qui peut se targuer d'avoir eu un impact gigantesque sur ce travail. Elle devrait probablement être citée dans tous les documents en lien avec ce projet de maitrise car elle a été une source de motivation inépuisable et d'une aide morale incommensurable.

Sans oublier Jack White et Colour Haze…

RÉSUMÉ

Le remblai en pâte cimenté (RPC) est une technologie qui gagne en popularité mondialement, particulièrement dans les dix dernières années. En effet, le remblayage permet d'entreposer de larges quantités de résidus miniers (jusqu'à 50%); ce qui a pour effet de limiter l'empreinte écologique des parcs à résidus en surface. Avant le début du remblayage, une barricade de stériles est construite dans le point de soutirage pour éventuellement retenir le RPC qui sera coulé dans le chantier souterrain. Les chantiers remblayés permettent ensuite de réduire les contraintes du massif rocheux en diminuant la convergence des murs, diminuant l'activité sismique en plus d'optimiser les procédés d'extraction de minerai. Cet entreposage de résidus miniers, très avantageux sur de multiples plans, amène en contrepartie des défis géotechniques importants. L'un de ceux-ci est la construction des barricades qui doivent demeurer sécuritaire tout au long du processus de remblayage pour les travailleurs, l'opération et la machinerie. Les barricades peuvent être construites avec du bois, du béton, des briques ou du béton projeté mais ces méthodes, quoique de grandes capacités géotechniques, sont dispendieuses et/ou complexes. Dans les mines québécoises, les barricades de stériles rocheux sont largement utilisées comme ouvrages de retenue de RPC du fait qu'elles soient peu dispendieuses, rapides à construire, versatiles, réutilisables et simples. Ce travail présente une large revue de littérature qui a tenté de regrouper toutes les mesures de pressions horizontales dans des chantiers remblayés avec du remblai en pâte. Plusieurs observations géotechniques utiles ont été réalisées lors de la construction des barricades en roches stériles, et des résultats de modélisation numériques ont été obtenus à l'aide du code de calcul Flac^{3D}. Ce mémoire présente également une méthode de conception empirique et phénoménologique simple et facile à utiliser pour le dimensionnement des barricades de stériles. Il est à souligner qu'une formule de dimensionnement permet de s'assurer d'une conception adéquate, mais ne pourra jamais remplacer le suivi attentif de personnes qualifiés avant, pendant et après la construction des barricades, étant donné leur nature très hétérogène.

ABSTRACT

Cemented paste backfill (CPB) technology is increasingly used in many mines worldwide and has become popular over the last decade. Indeed, backfilling allows underground storage of a large amount of tailings (up to 50%) which in turn decreases surface tailings storage facility (TSF) management, thereby reducing environmental impacts and ecological footprint. During the process of open stope filling, a barricade is constructed to retain the backfill and prevent its spill. Backfilled stopes can decrease the rock mass stress level by reducing wall convergence, help attenuating underground seismic activity and optimizing ore extraction. However, this underground storage of tailings as CPB comes with some geotechnical challenges. One of the major challenges is the construction of barricades that are unavoidable to ensure the safety of all the mine workers and the equipment during the whole process of backfilling. Wood, concrete, bricks and reinforced shotcrete barricades are high strength structures but are difficult to build and expensive. In Quebec mines, muck barricades made of development waste rocks are widely used as retaining structures located in extraction draw points. This type of barricade is cheaper than the other types of barricade. This work presents a vast literature review of all the measurement of horizontal and vertical pressure taken in stope backfilled with cemented paste. Numerous geotechnical observations related to the construction procedure of muck barricades and some original data collected from instrumented underground stopes and muck barricades. This work emphasis the importance of the construction of waste barricades and large number of simulations highlights the importance of rigorous visual inspections. A simple and easy-to-use analytical design method based on limit equilibrium analysis and punching shear mechanism is also proposed for realistic sizing of muck barricades which in turn could give more confidence in the rational design of these retaining structures. This study suggests that prior to, during and after a muck barricade construction qualified staff must monitor construction standards of these highly heterogeneous structures.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIÈRES vii

LISTE DES FIGURES xiii

LISTE DES TABLEAUX xix

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS xxi

TRADUCTION DE TERMES MINIERS COMMUNS xxii

LISTE DES ANNEXES xxiii

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte de l'étude 1

1.2 Problématique de l'étude 3

1.2.1 Impact du remblayage sur la SST 4

1.2.2 Problématique de la rupture des barricades 6

1.3 Objectifs de l'étude 9

1.4 Hypothèses et cadre scientifique 9

1.5 Structure du mémoire 10

1.6 Contributions de l'étude 11

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE 12

2.1 Ouvrages de retenue dans les exploitations minières en souterrain 12

2.1.1 Ouvrages de retenues d'eau 12

2.1.2 Types de barricades dans les mines souterraines 14

2.1.3 Retour sur les types de barricades les plus utilisés dans les mines souterraines 22

2.2 Mécanismes de ruptures des ouvrages de retenues du monde minier 23

2.3 Rupture des barricades de stériles 24

2.4 Mitigation des ruptures d'ouvrages de retenues souterrains 25

2.5 Compilation des mesures *in situ* dans des chantiers remblayés 28

2.5.1 Cas de la mine Fox (Manitoba, Canada) 28

2.5.2 Cas de l'instrumentation de la mine Chimo (Québec, Canada) 30

2.5.3 Cas de la mine Bouchard-Hébert (Québec, Canada) 32

2.5.4 Cas de la mine Doyon (Québec, Canada) 33

2.5.5 Cas de la mine Williams (Ontario, Canada) 35

2.5.6 Cas de la mine Vale Copper Cliff Complex (Ontario, Canada) 39

2.5.7 Cas no.1 de l'instrumentation à la mine Çayeli (Rize, Turquie) 40

2.5.9 Cas no.2 de l'instrumentation à la mine Çayeli (Rize, Turquie) 42

2.5.8 Cas de la mine Target (Afrique du Sud) 43

2.5.10 Cas de la mine Kidd (Ontario, Canada) 44

2.5.11 Cas des mines Kanowna Bell et Savannah Nickel (Ouest australien) 46

2.5.12 Cas de la mine Red Lake (Ontario, Canada) 49

2.5.13 Cas de la mine Coleman (Ontario, Canada) 50

2.5.14 Cas de la mine Garson Ramp (Ontario, Canada) 51

2.5.15 Cas de la mine Goldex (Québec, Canada) 53

2.5.16 Cas des mines Raleigh et Lafranchi (Australie) 53

2.5.17 Cas de la mine Kidd (Ontario, Canada) 56

2.6 Retour sur la compilation des études de cas 58

2.7 Prédiction des pressions sur une barricade de chantiers long trous remblayés grâce aux modèles physiques 62

2.8 Prédiction des pressions théoriques dans un chantier remblayé 65

2.8.1 Effet d'arche 67

2.8.2 Dissipation de la pression interstitielle 68

2.8.3 Résistance mécanique du RPC 68

2.9 Formules existantes pour le dimensionnement des bouchons en béton 69

2.10 Formules existantes pour le dimensionnement des barricades de stériles 72

2.10.1 Prédiction de la pression horizontale 72

2.10.2 Prédiction de la pression avec une solution analytique 74

2.10.3 physiqueAmélioration de la solution analytique de Li et Aubertin (2011) 76

2.10.4 Remarques finales 82

CHAPITRE 3 MÉTHOLOGIE ADOPTÉE 83

3.1 Description du site à l'étude, mine LaRonde 83

3.1.1 Contexte géologique de la mine LaRonde 83

3.1.2 Survol de la séquence de minage à la mine LaRonde 85

3.1.3 Fabrication du remblai en pâte cimenté 91

3.1.4 Recettes de remblai en pâte cimenté à la mine LaRonde 94

3.1.5 Types de liants utilisés dans la fabrication du RPC à la mine LaRonde 95

3.1.6 Système de distribution du RPC à la mine LaRonde 96

3.1.7 Contrôle-qualité du RPC à la mine LaRonde 97

3.1.8 Inspection de la galerie de soutirage 98

3.1.9 Application du béton projeté sur le côté aval de la barricade 99

3.1.10 Fabrication et transport du béton projeté à la mine LaRonde 100

3.2 Granulométrie des stériles rocheux par analyse d'images 102

3.2.1 Procédure de prises de photos pour l'analyse granulométrique WipFrag.....104

3.3 Instrumentation in situ d'un chantier long trou à la mine LaRonde..... 105

3.3.1 Fabrication des cages en acier.....105

3.3.2 Structure d'acier pour la suspension des cages sans ancrage au toit.....106

3.3.3 Extensomètres BOR-EX 107

3.3.4 Cellules TPC 110

3.3.5 Piézomètres 118

3.3.6 Inclinomètres biaxiaux 121

3.3.7 Cellules Decagon 5TE.....121

3.3.8 Enregistrements des données en continu.....122

3.3.9 Procédure d'installation de l'instrumentation des chantiers 123

3.3.10 Calibrage des instruments 126

3.3.11 Période et rythme d'acquisition de données.....126

3.4 Méthodologie pour la modélisation numérique 126

3.4.1 Mise en contexte de la modélisation avec FLAC^{3D} 126

3.4.2 Géométries du modèle numérique.....127

3.4.3 Détermination des pressions à appliquer dans le modèle.....133

3.4.4 Risque d'érosion absent du modèle.....135

3.4.5 Caractéristiques géomécaniques du modèle.....136

3.4.6 Absence de bassins de rétention dans le modèle.....137

3.4.7 Cas du béton projeté en aval de la barricade.....137

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION..... 138

4.1 Observation de tâches pour la construction de barricade.....138

4.1.1 Devis de barricades de stériles à la mine LaRonde.....138

4.1.2 Construction d'une barricade de stériles par déversement à l'aide d'une chargeuse-navette 142

4.1.3 Contrôle-Qualité des barricades de stériles à la mine LaRonde 146

4.1.4 Retour sur l'observation de tâches lors de la construction des barricades de stériles . 148

4.2 Mesures sur les barricades de roches stériles 149

4.2.1 Angle de repos des stériles 149

4.2.2 Compilation du tonnage des barricades de stériles à la mine LaRonde 151

4.2.3 Résistance en compression uniaxiale du stérile de LaRonde 153

4.2.4 Résistance en compression simple du béton projeté 153

4.2.5 Résultats et discussion de l'analyse granulométrique par WipFrag 155

4.2.6 Paramètres de description granulométrique 156

4.2.7 Propriétés géomécaniques des stériles 158

4.2.8 Propriétés du remblai en pâte à la mine LaRonde 161

4.2.9 Retour sur la détermination des propriétés géomécaniques des barricades de stériles de la mine LaRonde 162

4.3 Présentation des résultats pour les tests in-situ de pressions 162

4.5 Résultats de la modélisation d'une barricade de stériles pour la retenue du RPC à l'aide de FLAC^{3d} 173

4.5.1 Création de la géométrie du modèle dans le code Flac^{3D} 174

4.5.2 Retour sur les différents scénarios de modélisation 179

CHAPITRE 5 DIMENSIONNEMENT DES BARRICADES DE STÉRILES 181

5.1 Modèle empirique de dimensionnement des barricades de stériles 181

5.1.1 Proposition du modèle empirique 181

5.1.2 Détermination des paramètres du modèle 183

5.1.3 Vérification du modèle empirique 187

5.2 Retour sur les formules empiriques de dimensionnement 188

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 189

CHAPITRE 7 LISTE DES RÉFÉRENCES 193

ANNEXES 206

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Efficacité du remblayage dans la réduction des accidents par l'augmentation des aires remblayées (Gericke, 1998). 5
Figure 1-2: Exemple simplifié de devis de barricade et chantier longs trous remblayés à la mine LaRonde. 6
Figure 1-3: Fuite dans le coin supérieur gauche d'une barricade rocheuse; le RPC est à environ 1 m du toit de la galerie Turcotte et al. (2013). 7
Figure 1-4: Rupture d'une barricade de béton projeté (P. B. Hughes, 2008). 8
Figure 2-1 Principaux types d'ouvrages de retenue ou bouchons d'eau (mine plugs) dans les mines souterraines, adapté de Garrett et Campbell Pitt (1958, 1961). 13
Figure 2-2: a)Barricade mince de béton projeté avant que le béton soit mis en place, tirée de Revell et Sainsbury (2007a). b) Barricade de béton instrumenté (Grabinsky et al., 2011). 16
Figure 2-3: Croquis des barricades de béton projeté avec cadre ajustable, adapté de Andrews et al. (2010). 17
Figure 2-4: Croquis d'une barricade mince de béton projeté avec élingues comme support (vue de face et en coupe) adapté de Andrews et al. (2010). 17
Figure 2-5: Utilisation d'une plaque de poussée placée dans un godet de chargeuse-navette (photo prise à la mine LaRonde). 19
Figure 2-6: Barricade de stériles avant le placement de béton projeté (photo prise à la mine LaRonde dans le chantier 266-20-131B). 20
Figure 2-7: Matelas utilisés pour la construction de mur de ventilations ou jadis pour boucher le haut des barricades de stériles à la mine Louvicourt (photo prise dans une baie de matériau au niveau 114, à la mine LaRonde). 21
Figure 2-8: Partie supérieure de la barricade mixte bouchée avec des empilements de sacs d'Aquacrete (Skeeles, 1998). 22
Figure 2-9: Quatre types de rupture possibles proposés pour les barricades de stériles rocheux. .25
Figure 2-10: Schéma idéalisé en coupe d'un chantier de la mine Fox (Mitchell et al., 1975). 29
Figure 2-11: Pressions mesurées aux deux barricades instrumentées du même chantier (Mitchell et al., 1975). 29
Figure 2-12: Pressions à l'intérieur du chantier 17-5B-5 mesurées à la mine Chimo (Hassani et al., 1998). 31

Figure 2-13: Pressions totales mesurées au bas du chantier, mine Bouchard-Hébert, selon 3 axes en hauteur du remblai en fonction du temps (Zhu, 2002). 33
Figure 2-14: Chantier 8-1 FW à mine Doyon, sa géométrie et ses dimensions avec l'emplacement des cellules de pressions, tirée de Belem et al. (2004). 34
Figure 2-15: Évolution des pressions horizontales dans la galerie de soutirage du chantier 8-1 FW de la mine Doyon (Belem et al., 2004). 35
Figure 2-16: Pressions à court terme pour les deux TEPC, chantier 9415-55 (Grabinsky et Bawden, 2007). 36
Figure 2-17: Mesure des pressions à la barricade (FF = *fill fence*) et dans la cheminée d'Alimak, chantier 9415-55 (Grabinsky et Bawden, 2007). 37
Figure 2-18: Pressions mesurées à la barricade à court terme, chantier 9500-L70-5 (Grabinsky et Bawden, 2007). 38
Figure 2-19: Variations des pressions de 4 capteurs en fonction du temps (Fortin, 2008). 39
Figure 2-20: Pressions mesurées aux trois barricades instrumentées, le test 1 correspond au chantier remblayé en continu (Yumlu et Guresci, 2007). 40
Figure 2-21: Pressions mesurées sur une barricade en béton à la mine Çayeli (B. Thompson et al., 2012). 43
Figure 2-22: Pressions horizontales mesurées à 0,5 m du plancher sur une barricade construite à l'aide de TEKSEAL, chantier 278 WOS 1S (Ras et al., 2007). 44
Figure 2-23: Pressions totales mesurées sur 240 jours. Les évènements marquants sont indiqués : fin du remblayage (BC), sautage de production (PB), forage diamanté dans le chantier (DD), sautage primaire dans le chantier au-dessus (SL B), sautage final dans le chantier (SF B) et événements sismiques de magnitude 3,8 avec épicentre à 190 m (RB) (Thompson et al., 2009). 45
Figure 2-24: Pressions mesurées à 7 m et 17 m dans un chantier de RPC, cas de la mine KB (Helinski et al., 2010). 47
Figure 2-25:Pressions interstitielles mesurées à 7 m et 17m dans un chantier de RPC, cas de la mine SNM (Matthew Helinski et al., 2010). 48
Figure 2-26: Pressions totales (verticales et 2 horizontales), pressions interstitielles et la température mesurées au centre du chantier de la mine Coleman, données prises sur 20 jours (Thompson et al., 2013). 51

Figure 2-27: Pressions totales (verticales et 2 horizontales), pressions interstitielles et la température mesurées au centre du chantier de la mine Garson Ramp, données prises sur 20 jours (Thompson et al., 2013). 53
Figure 2-28: Pressions interstitielles (deux endroits) et pression horizontale à la barricade (Hasan et al., 2014).....54
Figure 2-29: Emplacement de l'instrumentation à la mine Lafranchi (Hasan et al., 2014).....55
Figure 2-30: Pressions interstitielles (deux endroits) et pression horizontale à la barricade, mine Lafranchi (tirée de (Hasan et al., 2014).....55
Figure 2-31: Photos de l'installation des capteurs de pression à la mine Kidd (Counter, 2015)....57
Figure 2-32: Évolution des pressions en fonction du temps à la mine Kidd (Counter, 2015). 58
Figure 2-33: Pressions mesurées à la base du modèle physique et comparé avec la formule [2-2] et la formule du poids des terres (Mitchell et Roettger, 1984).....63
Figure 2-34: Pression mesurée à la barricade en fonction du temps et des pressions appliquées (Soderberg et Busch, 1985).....64
Figure 2-35: Schéma d'un bouchon permanent en béton de masse avec forces en jeu, adaptée de Garrett et Campbell Pitt (1958).....70
Figure 2-36: Modèle de design de barricades de stériles proposé par Li et al. (2009) avec différents facteurs de sécurité en comparaison avec les devis de mine LaRonde. 76
Figure 2-37: Comparaison entre la longueur de la barricade au toit en fonction de différentes hauteurs et les différentes formules présentées avec les devis actuels de LaRonde. 79
Figure 2-38: Schéma d'un chantier et du niveau phréatique (adaptée de Helinski et Grice, 2007). 81
Figure 3-1: Géologie régionale de la mine LaRonde (Agnico-Eagle, 2014). 84
Figure 3-2: Longitudinale présentant le développement souterrain de la mine LaRonde (Mercier-Langevin, 2011). 86
Figure 3-3: Croquis en coupe des chantiers A et B et de leurs dimensions moyennes à la mine LaRonde. 87
Figure 3-4: Croquis montrant une séquence de minage souterrain par pyramide, vue en coupe...88
Figure 3-5: Croquis de la prise d'une volée de développement à la mine LaRonde. 89
Figure 3-6: Croquis en coupe de la séquence de remblayage d'un chantier long trou à la mine LaRonde. 91

Figure 3-7: Schéma de la destruction des cyanures et de la fabrication du remblai en pâte à la mine LaRonde. 94
Figure 3-8: Barricade de stériles chantier primaire (mine LaRonde) : a) chemins d'écoulement d'eau de drainage, b) zoom sur le bassin de rétention presque plein de 3 m de haut. 99
Figure 3-9: Transport du béton projeté de la recette du puits à la barricade via une bétonnière (1-2) jusqu'à la lance de projection de béton (3), photos prises par l'auteur à la mine LaRonde.....102
Figure 3-10: Cage en acier utilisée pour attacher les instruments de mesure. 106
Figure 3-11: Dessin technique du prototype servant à insérer des tubes de forage et à attacher les cages à partir du plancher après le sautage de production. 107
Figure 3-12: Installation d'extension de câbles stéréo pour augmenter la longueur des câbles des cellules 5TE.....14022
Figure 3-13: Coupe simplifié d'un chantier présentant l'emplacement prévu de chacun des instruments de mesures.....140
Figure 3-14: Coupe simplifié montrant la disposition spatiale des points de mesures.....140
Figure 3-15: Coupe en 4 temps de la procédure proposée pour le placement d'une tige de forage dans une barricade de stériles, nécessaire pour le placement des extensomètres.....140
Figure 3-16: Schéma d'un chantier classique remblayé.. 140
Figure 3-17: Géométrie du Modèle 1 avec les paramètres d'entrée modifiables.....140
Figure 3-18: Positionnement de différents points permettant la génération de blocs.....140
Figure 3-19: Positionnement de différents points au centre du modèle, non visible sur cette figure, les lignes A_0, C_0... et A_3, C_3 qui ferment le modèle à l'Ouest et à l'Est.....140
Figure 3-20: Positionnement de différents points au centre du modèle, non visible sur cette figure, les lignes B0, D0... et B3, D3 qui ferment le modèle à l'Ouest et à l'Est. 140
Figure 3-21: Vue en coupe du positionnement d'une couche de béton projeté du côté aval d'une barricade de stériles.. 140
Figure 3-22: Schéma simplifié du Modèle 2 qui se concentre uniquement sur un chantier remblayé avec du RPC.....140
Figure 3-23: Schéma représentant le Modèle 3 qui tient compte de la présence d'un chantier. Les plans bloqués et les paramètres sont présentés, l'ensemble comprend 23 blocs générés à partir de 184 sommets qui sont calculés de manière paramétrique avec les données d'entrée. 140

Figure 3-24: Modèle 1 tenant compte uniquement des phénomènes ayant lieu dans la galerie de soutirage. La longueur de cette galerie sera 3 fois la longueur de la barricade.....140
Figure 3-25: État général des pressions qui agissent sur une barricade et qui évoluent en fonction du temps.....140
Figure 3-26: Schéma de la méthode en aval théoriquement appliquée sous terre.....140
Figure 4-1: Compilation des différents devis de remblayage et de barricades simplifiés à la mine LaRonde (1 de 2).....140
Figure 4-2: Compilation des différents devis de remblayage et de barricades simplifiés à la mine LaRonde (2 de 2).....141
Figure 4-3: Montage de photos prises d'une barricade de stériles pendant les phases de construction à la mine LaRonde.....142
Figure 4-4: Schéma général d'une barricade de stériles, dessiné en fonction des observations de tâches sous terre. 145
Figure 4-5: Emplacement de barricades rocheuses et impact sur la qualité de la compaction anticipée. 146
Figure 4-6: Schéma des étapes de la construction d'une barricade de stériles, vue en coupe. 147
Figure 4-7: Capture d'écran prise dans le logiciel AutoCad qui montre l'angle réel de la barricade de stériles en amont, le contour en mauve pâle (trait épais) représente le contour du CMS, tirée du chantier 59-20-29. 151
Figure 4-8: Carottes de béton projeté avec strates de faiblesse causées par l'ajout excessif d'accélérant (Sylvestre, 2014). 155
Figure 4-9: Graphique en secteurs des événements en termes de pourcentage 166
Figure 4-10: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 1. 167
Figure 4-11: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 2. 168
Figure 4-12: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 2 dans l’intervalle de temps entre la première et la troisième coulée.....169

Figure 4-13 : Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 2 dans l'intervalle de la dernière coulée. 170
Figure 4-14:Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 3. 171
Figure 4-15: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius dans l'intervalle de temps entre la première et la troisième coulée. 172
Figure 4-16: Cas de la mine LaRonde, barricade à 8 m, déplacement en « X », chantier de 45 m. 178
Figure 4-17: Cas de la mine LaRonde, barricade à 8 m, déplacement en « X », chantier de 30m. 179
Figure 5-1: Coupe d'une barricade de roches stériles et les forces en jeu. 181
Figure 5-2: Schéma des propriétés des interfaces d'une barricade de stériles. 185
Figure 5-3: Rugosité équivalente en fonction de la porosité, de l'origine, de l'angularité et de la rugosité de stériles (adaptée de Barton 2008). 186
Figure 5-4: Abaque pour le choix de la valeur de S (adapté de Barton 2008). 186
Figure 5-5: Dimensionnement de barricades en faisant varier le poids volumique du remblai (avec le coefficient de rugosité R = 3) 187
Figure 5-6: Dimensionnement de barricades en faisant varier le poids volumique du remblai (coefficient de rugosité R = 15).....188

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Résumé des principaux types de remblai et leurs caractéristiques, tiré de Hassani et Archibald (1998) 2
Tableau 2-1: Résumé des principaux avantages et inconvénients des principaux types de barricade 23
Tableau 2-2: Résultats des mesures de pressions et de déformations pour les neufs barricades (Hughes et al., 2010). 49
Tableau 2-3: Résumé des principaux résultats de mesures des pressions in situ dans des chantiers remblayés (chantiers et barricades) 61
Tableau 2-4: Paramètres utilisés pour la comparaison entre Li et Aubertin (2011a) et Yang et al. (2014). 78
Tableau 3-1: Caractéristiques des résidus de la mine LaRonde (Deschamps, 2009) 93
Tableau 3-2: Caractéristiques techniques des cellules de pressions RocTest 108
Tableau 3-3: Coefficient thermique en fonction de l'étendue de mesure 110
Tableau 3-4: Erreurs et pressions mesurées par rapport aux pressions réelles appliquées 112
Tableau 3-5: Spécification de fabrications fournies par RocTest des cellules TPC 114
Tableau 3-6: Principales caractéristiques techniques des sondes 5TE de Decagon 122
Tableau 4-1: Types de barricade et description des différentes variantes répertoriées à la mine LaRonde 138
Tableau 4-2: Angle au repos du côté aval des stériles d'une barricade, mesures prises sur la barricade 206-21-39, mine LaRonde 150
Tableau 4-3: Angle au repos du côté aval des stériles d'une barricade, mesures prise sur la barricade 266-20-133 150
Tableau 4-4: Compilation des tonnages des barricades simples de stériles construites à la mine LaRonde entre le 1er janvier 2012 et août 2015 152
Tableau 4-5: Compilation des tonnages des barricades doubles de stériles construites à la mine LaRonde entre le 1er janvier 2012 et août 2015 152
Tableau 4-6: Propriétés géomécaniques des roches typiques de la mine LaRonde (Giroux, 2015) 153
Tableau 4-7: Résistance UCS des échantillons carottés de béton projeté avant et après une projection sous terre sur une planche de bois (Sylvestre, 2014) 154

Tableau 4-8: Résultats généraux des analyses granulométriques des barricades 191-21-53 et 266-20-131B obtenus par WipFrag 156
Tableau 4-9: Description de la granulométrie en fonction de différentes valeurs de coefficient d'uniformité (cf. Hassani et Archibald, 1998). 157
Tableau 4-10: Calcul des coefficients d'uniformité et du coefficient de courbure des stériles 158
Tableau 4-11: Propriétés des différents stériles de la mine LaRonde et moyenne de ces propriétés, utilisée lors de la simulation (chapitre 3). 159
Tableau 4-12: Propriétés des différents stériles de la mine LaRonde et ceux qui seront considérées dans la modélisation (chapitre 35) 159
Tableau 4-13: Contraintes verticales et horizontales en fonction de l'élévation, mine LaRonde 160
Tableau 4-14: Propriétés du remblai en pâte cimenté utilisées pour la modélisation (chapitre 3) 161
Tableau 4-15: Événements en fonction de la date et heure et quantité d'eau pour le nettoyage .. 164
Tableau 4-16: Commentaires expliquant les différents grands événements qui décrivent l'instrumentation. 165
Tableau 4-17: Données de chantier de mesure d'hauteur 166
Tableau 4-18: Propriétés de différents RPC retrouvés dans différentes mines 175
Tableau 4-19: Résumé des déplacements moyens selon deux emplacements en « x », au centre selon « y » et sur toute la hauteur en « z » dans les barricades de stériles avec différents paramètres 176
Tableau 4-20: Déplacements en "x" et en "z" à différents endroits à l'intérieur de la barricade en fonction de différents paramètres 177
Tableau 5-1: Paramètres utilisés pour déterminer le dimensionnement de la barricade 187

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

AEM: Agnico Eagle Mines Ltd

CMS: *Cavity Monitoring System*

CUAPS: *Curing Under Applied Pressure System*

DMA : Drainage Minier Acide

DNC : Drainage Neutre Contaminé

FW : *Footwall*

HW : *Hangingwall*

MSHA: *U.S. Mine Safety and Health Administration*

ND: Non disponible

NIOSH: *U.S. National Institute for Occupational Safety and Health*

POLY : École Polytechnique de Montréal

PTF : *Plug Tight Fill*

RPC : Remblai en Pâte Cimenté

RMS : Remblai Minier Souterrain

RR : Remblai Rocheux

RRS : Remblai Rocheux Sec

RRC : Remblai Rocheux Cimenté

TH : *Test Holes*

TPC *: Total Earth pressure Cell* (Cellule de Pression Totale)

TRP : Trou dans le Remblai en Pâte

TRU : Trou pour la distribution de Remblai en Pâte

UCS : *Uniaxial (Unconfined) Compressive Strength*

UQAT : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

URSTM : Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale

VMS (SMV) : *Volcanogenic Massive Sulphide* (Sulfure Massif Volcanogène)

TRADUCTION DE TERMES MINIERS COMMUNS

Cemented Aggregate fill (CAF), Composite mine fill, cemented Paste Aggregate Fill (PAF), Alluvial sand composite fill, blended paste fill : types de remblais composites

Bolter : Forer et insérer un boulon

Brawl : Épaulement d'un chantier long trou

Breather pipe : Tuyau d'évacuation (purge) de pression

Casing : Tube de forage

Fly ash : Cendres volantes

Footwall : Éponte inférieure du chantier

Hangingwall : Éponte supérieure du chantier

In situ : sur le terrain (mesures prises)

Muck : Stériles tout-venant

Piping : Canal d'érosion

Plug Tight Fill (PTF) : Barricade de stériles tout-venant avec béton projeté

Pressure valve release : Valve de réduction de suppressions

Push-plate ou *boomblade* : Plaque de poussée

Rammer : Synonyme de push-plate utilisé en Australie

Raise : Cheminée minière alésée

Ready-mix : Bétonnière

Rebars : Barres d'armature

Scoop : Chargeuse-navette LHD (*Load-Haul-Discharge*)

Screen : Grillage

Shotcrete : Béton projeté

Sill : Lentille minéralisée étroite minée longitudinalement

Slag (*ground granulated blastfurnace*): Laitiers de hauts fourneaux ou scories

Test Holes : Trous témoins

Tight filling : Remblayage jusqu'au toit d'un chantier y compris la galerie

LISTE DES ANNEXES

ANNEXES A – Plan du chantier 262-20-35A.....205

ANNEXE B – Fiche d'inspection proposée d'une barricade de stériles.....206

ANNEXE C – Développement à travers le RPC 207

ANNEXE D - Développement à travers le RPC.....208

ANNEXE E – Plaque de poussée.....210

ANNEXE F – Analyse WipFrag avec une photo de barricade de stériles.....211

ANNEXE G – Étapes de la modélisation FLAC 3D 212

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

Ce projet de recherche a été réalisé sur le site de la Mine LaRonde située dans la localité de Preissac en Abitibi-Témiscamingue, dans l'ouest du Québec. La mine LaRonde exploite un gisement de classe mondiale du nom de LaRonde-Penna qui est la propriété de Mines Agnico Eagle Limité (AEM). AEM possède huit mines situées au Canada, en Finlande et au Mexique. De ses huit opérations minières, quatre utilisent du remblai en pâte cimenté (RPC), soit les mines Goldex, LaRonde, Kittilä et Pinos Altos (Ouellet, 2015). Cette étude se concentrera sur la division LaRonde d'AEM. La minéralisation de ce gisement est de type sulfures massifs volcanogène et contient des valeurs économiques d'or (Au), d'argent (Ag), de zinc (Zn) et de cuivre (Cu). Exploitée depuis 1988, la mine LaRonde utilise deux méthodes d'extraction principales soit l'abattage long trou longitudinal et transversal. Les chantiers sont remblayés à l'aide de divers types de remblai minier (rocheux cimenté, rocheux sec, en pâte cimenté, ou le mélange de ces techniques de remblayage). Depuis 2005, la mine LaRonde a débuté le minage du secteur profond du gisement appelé LaRonde Extension qui amènera les opérations à des profondeurs allant jusqu'au moins à 3 110 m. Évidemment, l'extraction de minerai à des profondeurs aussi importantes implique une gestion rigoureuse de l'état du massif rocheux. Plusieurs innovations en termes de contrôle de terrain continuent de voir le jour et cette voie de l'innovation semble être celle adoptée par AEM pour poursuivre sa production avec une politique d'accident zéro d'Agnico-Eagle (2014).

Afin de poursuivre dans cette optique de santé et sécurité au travail (SST), la mine LaRonde doit pouvoir garantir la sécurité de ses travailleurs et optimiser le processus d'extraction de minerai. Ce qui revient, en partie, à utiliser du remblai en pâte cimenté (RPC) comme support secondaire. Ce type de soutènement secondaire permet de diminuer localement le niveau de contrainte dans le massif rocheux (avec une répercussion au niveau global), de réduire la convergence des murs (Sgaoula, 2001; Williams et al., 2001), de réduire l'activité sismique (Doucet et Harvey, 2001; Gurtunca et al., 2001; Hassani et al., 2001; Seymour et al., 2013; Spearing et Milette, 2001) et d'optimiser la récupération du minerai (Blake et Hedley, 2003; Evans et al., 2007). Le remblai rocheux est parfois également utilisé par l'opération, le Tableau 1-1 résume les différentes caractéristiques des trois principaux types de remblai.

Tableau 1-1 : Résumé des principaux types de remblai et leurs caractéristiques, tiré de Hassani et Archibald (1998)

	Remblai rocheux	**Remblai hydraulique**	**Remblai en pâte cimenté (RPC)**
Synonyme	-	Remblai pulpeux	Remblai haute-densité
Histoire	1960 – début ajout de liants pour RRC	Première utilisation 1864 (Pennsylvanie, USA)	Première utilisation 1980 (Allemagne)
Composition	Roches stériles (origine minière ou non)	Résidus non sulfureux hydocyclonés, moins de 20 % de fines*	Résidus de concentrateur non ségrégés
Hydrocyclonage	Non	Toujours	Parfois
Cimenté	Oui ou non	Oui ou non	Toujours
Ratio Eau/ciment	Faible	Élevé	Moyen
% ciment	Moyen (coulis 5 à 6 %)	Élevé (entre 4 et 7 %)	Basse
Ajout de sable	Jamais	Fréquent	Parfois
C_w (% solide)	Sec	Environ 60-70 % solide	Entre 75-85%
Transport	Monteries ou camions ; ciment à part	Trou foré ou pipeline, par gravité	Trou foré ou pipeline, par gravité ou pompage
Ségrégation	Élevée	Moyenne et décantage	Nulle
Mise en place	100 à 400 tonnes/h	100 à 200 tonnes/h	50 à 200 tonnes/h
Barricades	Minime ou absente	Complexe et onéreuse	Simple et peu dispendieuse
Drainage	Aucun	Abondant	Négligeable
Résistance	UCS >5 MPa	UCS < 1 MPa	UCS = 0,2 à 4 MPa
Investissement capital	Moyen	Bas	Élevé
Coût d'utilisation	Élevé	Moyen	Faible
Avantages	- Réduit la quantité de stériles en surface - Préparation simple - Résistances mécaniques élevées	- Simple à mettre en place et opérer - Requiert peu de supervision - Constituants ajoutés à l'usine (bon contrôle qualité) - Avec hydrocyclonage, bon taux de percolation (100 mm/h) - L'utilisation de pompes est réduite avec bon schéma - Diminution des dépôts de rejets en surface	- Meilleur rapport résistance/liants que l'hydraulique - Peu de drainage donc moins de lessivage des liants - Construction de barricades peu coûteuses - Reste longtemps saturé donc peu de potentiel pour DMA - Fixe métaux lourds avec faible conductivité hydraulique - Diminution des dépôts de rejets en surface
Inconvénients	- Coûts élevés du transport des matériaux - Mise en place avec forte ségrégation - Résistance mécanique variable dans le chantier - Tous les rejets restent en surface - Porosité élevée donc potentiel DMA et auto-ignition - Contrôle qualité complexe et ségrégation - Extension limité par l'emplacement des chutes à stérile - Traffic important de camions dans les accès	- Le surplus d'eau ajouté doit être pompé en surface - Perte de liants par drainage - Lessivage des particules fines par drainage - Construction de barricades hydrostatiques coûteuses - Distribution non uniforme du liant par entraînement - Uniformisation de la granulométrie nécessaire (drainage) - Résistance mécanique variable dans le chantier - Problèmes d'usures dans le système de distribution	- Récent, technologie encore à optimiser - Peut nécessiter l'utilisation de pompes dispendieuses - Installation de filtrages importants - Nécessite un contrôle qualité serré - Potentiel de liquéfaction lorsque saturé - Problème d'auto-ignition avec présence de pyrrhotite - Évolution de la résistance mécanique dans le temps - Problèmes d'usures dans le système de distribution
		*taille des fines = moins de 10 μm	*taille des fines = moins de 20 μm

Sur le plan de la ventilation minière, le remblai permet de diminuer la quantité totale de masse d'air sous terre ; ce qui, dans le cas de LaRonde, diminue aussi le volume d'air à climatiser (Hallbom, 2007). Ce type de support secondaire de terrain a toutefois un impact financier important (entre 10 et 20%) sur les coûts de production (Bloss et Revell, 2001; Grice, 1998; Isagon et al., 2011; Waterland, 1973). C'est pourquoi une compréhension plus poussée de l'ensemble de la séquence de remblayage est nécessaire afin d'optimiser les coûts de remblayage. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet de recherche de cette maîtrise qui a pour but général de tenter de mieux caractériser les propriétés géomécaniques des barricades rocheuses et des chantiers miniers remblayés à la mine LaRonde en vue de leur analyse de stabilité.

1.2 Problématique de l'étude

Dans le cadre de ses activités d'extraction et de traitement du minerai, l'industrie minière génère d'immenses quantités de stériles et de résidus fins de broyage (rejets de concentrateur). La fraction broyée qui est non-économique, ou bien contenant des métaux dont l'extraction est trop coûteuse à extraire doit être entreposée dans des aires d'accumulation en surface. Ces aires, appelées parc à résidus, demandent une gestion continuelle, et ce, même après la fermeture des opérations minières, puisque celles-ci présentent de nombreux risques pour l'environnement. L'un des principaux risques est lié aux sulfures de fer généralement associés aux minéraux métalliques et aux métaux précieux et qui sont à l'origine du drainage minier acide (DMA). Des minéraux tels que la pyrite ou la pyrrhotite mises en contact avec l'oxygène et l'eau créent des réactions d'oxydation dont les produits acides, ont des potentiels extrêmement dommageables pour l'environnement. Le coût de la restauration des sites générateurs d'eaux acides dans des empilements de stériles ou des parcs à résidus se chiffre en plusieurs millions de dollars (Johnson et Hallberg, 2005; Jung et Biswas, 2002). Pour pallier ce problème potentiel, de nombreuses solutions continuent d'être développées avec comme but premier de limiter au maximum l'oxydation des sulfures de fer. Parmi ces techniques, on retrouve : l'ennoiement, le recouvrement en sol avec ou sans géotextile (couvertures multicouches), les barrières capillaires, les nappes surélevées, la disposition de résidus épaissis, la désulfuration ou encore le co-dépôt (ou dépôt mixte) des résidus et des roches stériles (Aubertin et al., 2002, 2015; Mbonimpa, 2014; Wilson et Longo, 2007). Le désavantage majeur de ces techniques est la difficulté de garantir la stabilité physique à long terme des ouvrages de retenue (p. ex. la rupture des digues) des résidus ainsi que

la stabilité chimique des résidus (potentiel de génération de DMA ou de drainage neutre contaminé, DNC). Une des méthodes très intéressantes de gestion des rejets miniers (résidus avec potentiel de drainage acide ou contaminé) est le remblayage minier souterrain (RMS). En limitant le volume des parcs à résidus en surface, on diminue du même coup les risques associés à garder 100% de ces résidus miniers en surface (Aubertin et al., 2002, 2015; Jung et Biswas, 2002; Mbonimpa, 2014).

Le RMS et plus spécifiquement l'utilisation du RPC, nous amène à considérer un autre aspect non négligeable, qui est la santé et sécurité au travail (SST). Le remblayage permet d'augmenter la stabilité des ouvrages souterrains et par le fait même la sécurité des travailleurs. La résistance mécanique du RPC conforte la stabilité des épontes des chantiers ; ce qui diminue la dilution et par conséquent augmente les réserves exploitées (Belem et al., 2000; Hassani et Archibald, 1998). Le remblayage avec du RPC permet donc de diminuer significativement les risques d'instabilités souterraines (chute de blocs, coup de terrain, convergence de murs, activité sismique, etc.) ; ce qui implique logiquement une diminution des risques pour les travailleurs miniers particulièrement dans les mines profondes (Gurtunca et al., 2001; Jung et Biswas, 2002). Dans certains cas, le RPC réduit les besoins de ventilation (Jundis et Evans, 2013) ou aide à contrôler la ventilation et peut même servir à refroidir l'air sous terre (Belem et al., 2015). Ce type de remblayage est très versatile et largement utilisé, mais il pose néanmoins certains défis essentiellement en raison des incertitudes sur leurs propriétés géomécaniques lors du remblayage, après la mise en place et durant la période de cure (Thompson et al., 2012).

1.2.1 Impact du remblayage sur la SST

Gericke (1998) a mis au point un graphique (Figure 1.1) qui représente le nombre d'accidents en fonction des volumes remblayés. Le graphique montre qu'au-delà de 50% de zones minées, le taux d'accidents augmente de manière nettement moins rapide. Ainsi, il est facile de voir l'effet du remblayage sur la SST et la productivité minière.

Du point de vue économique, la récupération de piliers avec l'utilisation du RPC a permis dans le passé, à la mine Louvicourt, de bonifier les réserves de 20% (Cayouette, 2003). L'utilisation du RPC et surtout l'achat de liants pour sa conception a des effets importants sur les coûts de production. Le RPC représente entre 10 et 20% des coûts d'opération d'une mine et dont 75 à 80% de ces coûts sont associés à l'achat de liants (Belem et Benzaazoua, 2008; Belem et al., 2015;

Bloss et Revell, 2001; Jung et Biswas, 2002). D'où l'importance pour les opérateurs miniers d'optimiser l'utilisation du RPC dont les investissements initiaux (coûts en capitaux ou « Capital Expenditure (CAPEX) » demeurent élevés par rapport au remblai hydraulique ou au remblai rocheux. L'optimisation peut occasionner des économies importantes pour une opération de remblayage en permettant de réduire la quantité d'agent liant (ex. ciment Portland, cendres volantes, scories, etc.)

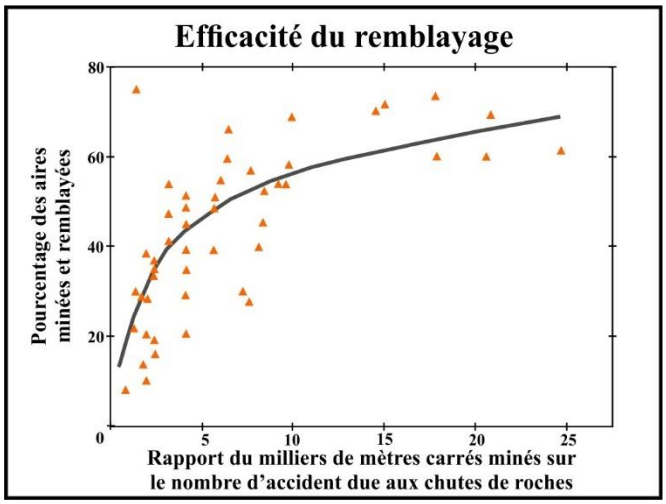


Figure 1-1: Efficacité du remblayage dans la réduction des accidents par l'augmentation des aires remblayées (Gericke, 1998).

Un autre aspect non négligeable est le design des barricades de retenue du RPC situées dans le point de soutirage (PS) inférieur. Les barricades présentent de nombreux défis d'ingénierie puisqu'il existe très peu de littérature proposant des devis standards et garantissant un bon niveau de sécurité. L'essentiel des solutions proposées dans la littérature repose sur des approches analytiques basées sur de nombreuses hypothèses parfois éloignées des réalités souterraines. Certains auteurs ont utilisé les simulations numériques, mais les propriétés des matériaux utilisées présentent un important degré d'incertitude qui ne permet pas de tirer des conclusions fiables quant à l'élaboration de devis de barricades. Par souci de sécurité, la majorité des opérations minières privilégient le remblayage en deux étapes (ou plus) afin de limiter les pressions exercées sur les barricades (Archibald et al., 2009). Dans ce cas, une première coulée appelée « bouchon » est mise en place et après une courte période de cure (entre 24 et 72 h), la coulée dite de « masse » ou « résiduelle » vient terminer le remblayage du chantier minier. Le rôle de la barricade est de retenir le RPC en place tout en supportant les pressions exercées par la colonne de RPC avant que les

processus d'hydratation entrent en ligne de compte pour limiter les pressions sur la barricade. La Figure 1-2 présente une adaptation d'un devis de construction d'une barricade rocheuse à la mine LaRonde. Pour éliminer le remblayage en 2 étapes afin de diminuer le temps du cycle de remblayage et d'augmenter la productivité en remblayant de manière continue, il est crucial d'avoir une confiance accrue concernant la capacité et la stabilité des barricades de stériles rocheux.

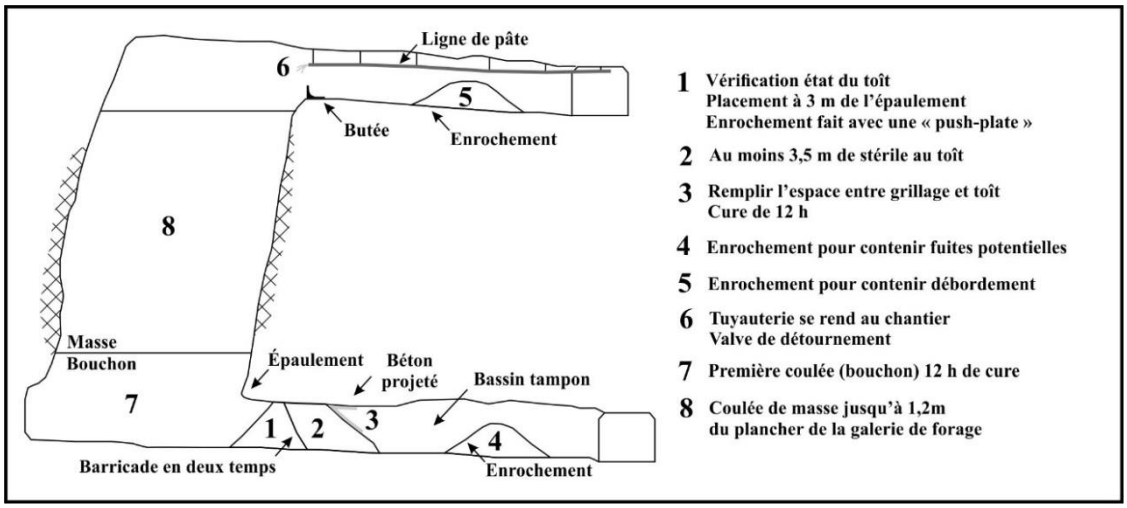


Figure 1-2: Exemple simplifié de devis de barricade et chantier longs trous remblayés à la mine LaRonde.

Bien que le RPC soit utilisé depuis plus de quatre décennies, il est encore relativement peu connu au niveau de la rhéologie, des interactions entre les minéraux réactifs et les liants, de son potentiel d'auto-ignition, de l'évolution du comportement mécanique ou encore de l'évolution des propriétés hydriques des remblais (Benzaazoua et al., 2005; le Roux et al., 2005).

1.2.2 Problématique de la rupture des barricades

Les statistiques canadiennes compilées par (De Souza et al., 2009) sur l'ensemble des opérations de remblayage allant de la préparation du remblai à sa cure dans le chantier montrent qu'environ 8% des défaillances répertoriées sont associés aux ruptures des barricades. Malgré ce faible pourcentage, c'est le type de défaillance qui présente les risques les plus élevés et les conséquences les plus graves pour le personnel et les équipements (Archibald et al., 2009) et dont les effets économiques en termes de retard de production sont les plus élevés.

À la mine LaRonde, seulement une rupture majeure de barricade de stériles rocheux a été rapportée depuis son entrée en opération, sans compter les fuites (*spills*) plus ou moins importantes qui ont nécessité la reprise de la construction de barricades. L'événement majeur, qui a laissé s'échapper environ 4 200 tonnes de RPC, s'est produit à la suite de la rupture d'une barricade au niveau 194 en mars 2013. Plusieurs équipements ont été endommagés et un nettoyage majeur a dû être entrepris sur le niveau et heureusement, sans aucun incident sur le plan humain. Le rapport interne a montré que la conception de la barricade était déficiente. Une quantité insuffisante de stériles rocheux a été placée et aucun béton projeté n'avait été mis en place sur la face aval de la barricade. La rupture s'était produite au coin supérieur gauche de la barricade comme le montre la *Figure 1-3* (Turcotte et al., 2013).

Figure 1-3: Fuite dans le coin supérieur gauche d'une barricade rocheuse; le RPC est à environ 1 m du toit de la galerie Turcotte et al. (2013).

Il est ardu de trouver des statistiques générales sur la rupture de barricades, mais Helinski et al. (2010) rapportent 12 bris de barricades en briques retenant du remblai hydraulique entre 2003 et 2006 en Australie. Les auteurs ne mentionnent ni leurs sources, ni le type de barricades, ni les mines touchées. Sivakugan et al. (2006) font mention de 11 ruptures de barricades de briques retenant du remblai hydraulique entre 1980 et 1997, à la mine Mount Isa en Australie (Kuganathan et Neindorf, 2005).

Currie (1998) qui a sondé trois mines canadiennes non identifiées qui utilisaient le remblai en pâte cimenté a rapporté des ruptures de barricades sans en préciser l'ampleur. Cependant, toutes les ruptures se seraient produites dans des chantiers étroits et hauts, remblayés rapidement (100 tonnes par heure).

L'évènement le plus singulier a été rapporté par Broad (2007). En effet, en juin 2000, une rupture de barricade de briques à la mine Bronzewing dans l'ouest de l'Australie a laissé échapper 19 000

m^3 de remblai hydraulique non cimenté. Cet accident a causé la mort de trois mineurs, et onze blessés, en plus d'engloutir plusieurs équipements miniers lourds. Cet accident a forcé de nombreuses opérations minières australiennes à revoir leur pratique en termes de dimensionnement de barricades de retenue du remblai hydraulique.

Revell et Sainsbury (2007b) rapportent trois ruptures de barricades de béton projeté dans différentes mines australiennes non spécifiées. Une première rupture, due à une chute de blocs d'environ 300 tonnes dans un chantier, qui a provoqué le déversement de 500 m^3 de remblai en pâte sur le niveau sans conséquence pour aucun travailleur. Les auteurs rappellent que les barricades sont en général conçues pour retenir le chargement statique, mais demeure très sensibles au chargement dynamique. Les deux autres ruptures rapportées sont associées à de l'érosion régressive sur les contours des ouvrages de retenue. Pour l'un des deux cas, la barricade comme telle est demeurée intacte, mais pas les murs sur lesquels elle était appuyée. Dans le deuxième cas, une rupture majeure de la barricade de béton projeté s'est produite. Cette fois, en raison d'une épaisseur de béton projeté sous la valeur prévue par le devis.

Hughes (2008) fait référence à une rupture de barricade de béton projeté à la mine Red Lake le 19 janvier 2007 comme le montre la *Figure 1-4*.

Figure 1-4: Rupture d'une barricade de béton projeté (P. B. Hughes, 2008).

La rupture a été provoquée par l'absence de tuyau de décompression de surpressions (*breather pipe*). Ce tuyau permet lors du remplissage aveugle d'une chambre que la pression ne s'accumule pas lorsque la cavité est pleine. Dans ce cas-ci, l'absence de ce tuyau d'évacuation et d'un suivi

inadéquat du remblayage a favorisé une surpression au niveau de la galerie pendant le remblayage. L'usage de *breather pipe* est répandue. Les devis de remblayage pour les cavités remblayées à l'aveugle à la mine LaRonde font référence à ce type de tuyau de décompression. Une valve est aussi placée de manière stratégique sur une section de tuyau pouvant se briser en cas de surpression (*pressure release valve*). Dans le cas où la pression s'accumulerait de manière trop importante dans une chambre aveugle, ce serait la *pressure release valve* qui briserait plutôt qu'une jonction de tuyau ou encore la barricade retenant la pâte.

En définitive, pour des raisons environnementales, de santé et sécurité et d'optimisation d'extraction, l'étude *in situ* du remblai en pâte cimenté est pertinente et essentielle pour la majorité des opérations minières souterraines à travers le monde.

1.3 Objectifs de l'étude

L'objectif général de ce projet de recherche est de caractériser les propriétés géomécaniques des barricades rocheuses et des chantiers miniers remblayés en vue de leur analyse de stabilité. Les objectifs spécifiques du projet sont :

1. Mettre sur pied une campagne d'instrumentation et d'un protocole expérimental adapté à la prise de données *in situ* dans des chantiers miniers long-trous remblayés à la mine LaRonde;
2. Déterminer les propriétés physiques et géomécaniques des barricades de stériles rocheux afin d'identifier les facteurs clés dans leur analyse de stabilité et de proposer une procédure garantissant la qualité de construction des barricades de stériles rocheux;
3. Effectuer une analyse numérique 3D sommaire d'un chantier souterrain et d'une barricade de stériles rocheux à l'aide du code de calcul $FLAC^{3D}$;
4. Proposer une formule de dimensionnement d'une barricade de stériles rocheux pour la retenue de remblai en pâte cimenté.

1.4 Hypothèses et cadre scientifique

Les hypothèses de base de ce projet de recherche sont les suivants :

H_0 : L'acquisition de connaissances suffisantes au sujet des propriétés géomécaniques des barricades de roches stériles et l'utilisation de devis de barricades de roches stériles adéquats permettront de remblayer un chantier souterrain en continu (*continuous filling*).

H_1 : Le remblayage en continu permettra d'optimiser de manière importante la séquence de minage et par la même occasion, de sauver des coûts importants.

Le cadre scientifique de ce projet de recherche sera principalement expérimental et numérique avec des références théoriques. En effet, l'acquisition de connaissances suffisantes des conditions dans lesquelles le remblai en pâte cimenté sera mis en place (facteurs extrinsèques) et des propriétés des ingrédients du mélange lui-même et de la géomécanique de la barricade (facteurs intrinsèques) permettra de mieux concevoir les barricades de roches stériles.

1.5 Structure du mémoire

Le mémoire est divisé en 6 chapitres distincts, dont le Chapitre 1 présente l'introduction.

Le Chapitre 2 présente une revue de littérature exhaustive traitant des principaux types de remblais miniers et d'ouvrages de retenue (barricades) dans le monde minier souterrain. Ce même chapitre présente quelques mécanismes de rupture de barricades, les moyens d'y remédier ainsi que la compilation des mesures *in situ* de pressions disponibles à travers la littérature.

Le Chapitre 3 présente la méthodologie adoptée dans cette étude : le contexte du remblayage à la mine LaRonde, la fabrication de RPC, les recettes de mélange, les types de liant, le système de distribution, le contrôle-qualité, les inspections des points de soutirage pré-remblayage, les devis et la construction de barricades de roches stériles, les différentes propriétés géomécaniques essentielles des barricades de roches stériles à la mine LaRonde, la modélisation numérique 3D à l'aide du code de calcul $FLAC^{3D}$, incluant les objectifs de modélisation, la géométrie du modèle numérique et les conditions aux limites, les propriétés utilisées.

Le Chapitre 4 présente l'ensemble de tous les résultats obtenus.

Le Chapitre 5 rassemble plusieurs éléments préalablement discutés afin de développer et de proposer un nouveau modèle pour le dimensionnement d'une barricade de roches stériles pour la retenue de remblai en pâte cimenté.

Enfin, le Chapitre 6 présente les principales conclusions et recommandations de ce mémoire.

À noter que des informations supplémentaires en appui aux résultats sont présentées dans les nombreuses annexes qui permettent de mieux comprendre le contexte de l'étude.

1.6 Contributions de l'étude

Le remblayage avec du remblai en pâte cimenté (RPC) est une méthode très versatile et largement utilisée par l'industrie minière. Ce type de remblai pose néanmoins certains défis essentiellement en raison des incertitudes sur ses propriétés géomécaniques lors du remblayage, après la mise en place et durant la période de cure. De plus, le design de barricades rocheuses situées dans le point de soutirage inférieur présente de nombreux défis d'ingénierie puisqu'il existe très peu de littérature proposant des devis standards et garantissant un bon niveau de (confiance) sécurité.

Les résultats et les données de qualité présentés dans ce mémoire ont permis d'élargir la proposition de devis de barricades à la disposition de l'industrie minière et de proposer une nouvelle méthode de dimensionnement pour les barricades de stériles rocheux. Les recommandations proposées lors de la construction, basées sur de nombreuses observations de tâches, permettront d'augmenter la qualité de ces ouvrages. Les procédures expérimentales pourront être facilement reproduites pour d'autres chantiers miniers. Ce projet de recherche contribue donc à combler partiellement certaines lacunes de connaissances dans l'industrie minière canadienne portant sur l'analyse de stabilité des barricades de roches stériles.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE

2.1 Ouvrages de retenue dans les exploitations minières en souterrain

Dans le monde minier souterrain il existe deux types d'ouvrages de retenue selon le matériau ou la substance à confiner : les cloisons ou bouchons (*mine plugs*) et les barricades. Les cloisons ou bouchons sont construits pour retenir généralement de l'eau dans des excavations souterraines agissant comme des réservoirs d'eau et sont faits en béton de masse. Quant aux barricades de retenues des remblais miniers, il en existe plusieurs types (voir section 2.1.2) faits de différents types de matériau (roches stériles, béton projeté, briquettes, préfabriqué, etc…).

2.1.1 Ouvrages de retenues d'eau

La Figure 2-1 présente les principaux ouvrages de retenue d'eau construits en béton et qu'il est possible de retrouver dans différentes mines. Lang (1999) a résumé des sous-catégories d'ouvrages en béton et fabriqués avec du stérile en s'attardant principalement à ceux fabriquées à l'aide de béton. L'auteur définit les structures permanentes en béton qui doivent retenir d'importantes colonnes d'eau comme des bouchons. Certains ouvrages sont classés comme des barrages souterrains et construits avec la ferme intention qu'il demeure actif à très long terme. Ils doivent retenir de manière permanente l'eau et les résidus à fort potentiel de génération acide dans des environnements montagneux. Ces ouvrages permanents demandent des designs d'ingénierie poussés, mais plusieurs critères de conception peuvent être appliqués à des designs plus temporaires comme ceux des barricades rocheuses.

L'ennoiement est une technique utilisée en Abitibi dans plusieurs mines pour limiter la génération de drainage minier acide en limitant l'oxygénation de minerai sulfureux à la suite de la fermeture d'une mine. Les anciennes mines en terrain montagneux présentent des défis supplémentaires par rapport aux mines abitibiennes. Le relief oblige l'installation de barrages à l'intérieur de galeries pour contrôler l'eau souterraine acide. Les barricades construites dans un contexte minier toujours en opération ont une vie utile nettement plus courte. Néanmoins, de nombreux parallèles, en ce qui a trait à la conception, peuvent être faits entre les ouvrages souterrains permanents et temporaires.

Dans certaines conditions, des designs permanents vont être utilisés dans un contexte de mines souterraines toujours en opération. C'est le cas lors de la construction de barrages hydrostatiques pour retenir des colonnes d'eau importante. Le cas de la mine Pamour no.1 rapporté par Kalsi (1994) est un exemple. Pour pallier un problème d'infiltration d'eau sous terre durant les crues printanières et d'un manque d'eau pendant l'été, un bouchon parallèle a été construit pour entreposer 600 mètres de colonne d'eau (2000 pieds). Cet ouvrage en cas de rupture avait le potentiel d'inonder la partie de la mine Pamour no.1 toujours active.

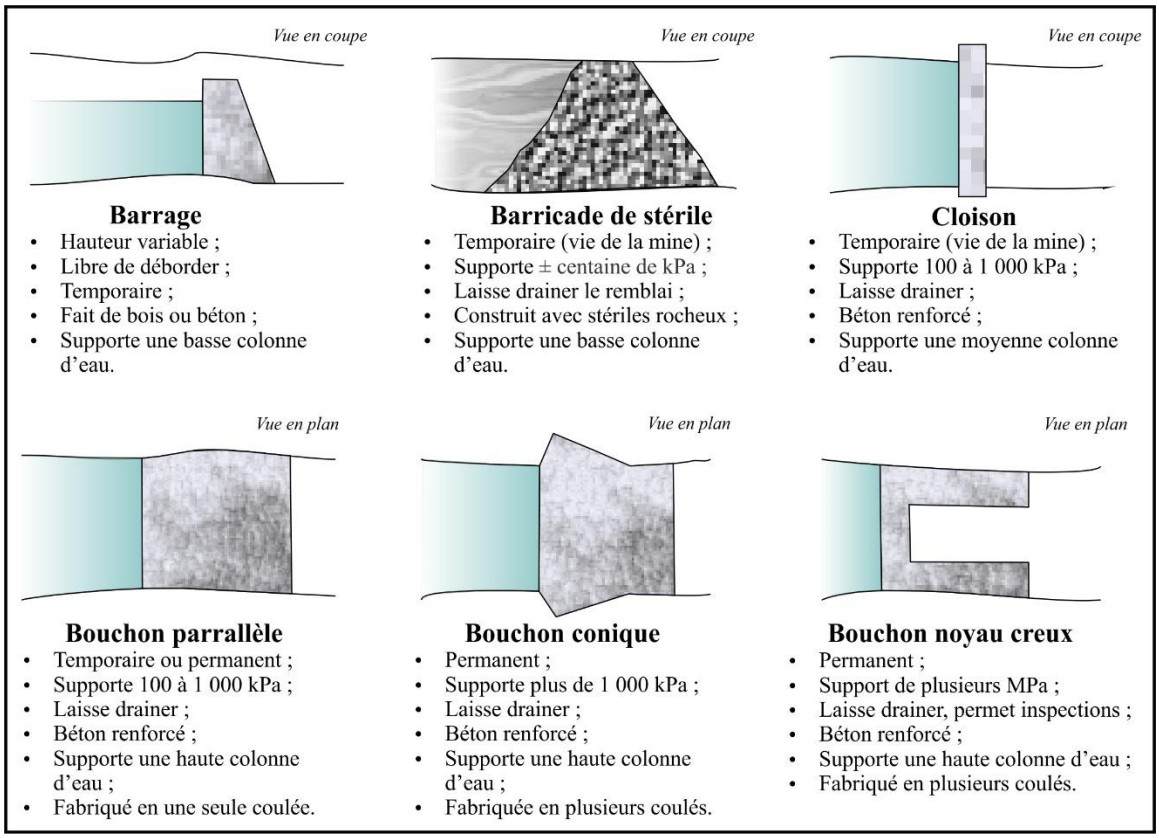


Figure 2-1 Principaux types d'ouvrages de retenue ou bouchons d'eau (mine plugs) dans les mines souterraines, adapté de Garrett et Campbell Pitt (1958, 1961).

Les barricades et les cloisons sont conçues pour supporter des pressions relativement basses tandis que les digues de barrage et les bouchons (*mine plugs*) sont conçus pour supporter d'importantes pressions hydrostatiques et de manière permanente. C'est donc dire que les bouchons et les digues de barrage nécessitent des critères de design plus élaborés et des facteurs de sécurité plus importants. Comme les bouchons sont permanents et que l'exploitant veut limiter le besoin d'entretien dans le futur, une étude géotechnique et hydrogéologique est nécessaire préalablement

à l'implantation de la structure pour choisir le site le plus approprié. Les paramètres à déterminer pour choisir l'emplacement comprennent :

- La résistance au cisaillement de la roche encaissante ;
- La présence de zone de cisaillement, de failles ou fractures ;
- La conductivité hydraulique de la masse rocheuse ;
- La pression de confinement ;
- Le besoin de renforcement avec du support de terrain ;
- La nécessité de cimenter des fractures ;
- Les pressions anticipées sur l'ouvrage ;
- Le risque d'événements sismiques.

De plus, si le béton est fabriqué à partir de granulats de mine ou de carrière, une étude minéralogique des granulats est à prévoir. Les devis des bouchons de béton doivent aussi tenir compte des risques de ruptures multiples. Dans le livre de Hudson et al. (1993), les auteurs font référence aux cinquante cas les plus désastreux de ruptures de bouchons dans des tunnels à partir desquels les mécanismes de rupture ont été étudiés. Ces ruptures ont été causées en majorité par : des tremblements de terre, par l'érosion régressive de la roche encaissante, par la détérioration de la masse rocheuse par chute de blocs et finalement par des phénomènes de dissolution. La résistance mécanique d'un bouchon dépend de celle du matériau qui la constitue ou de la roche sur laquelle elle repose (utilisation de critères de rupture tels que Hoek, 1988, Hoek et Brown, 1980 et Hoek et al., 1992).

2.1.2 Types de barricades dans les mines souterraines

Peu importe le mode de remblayage choisi (en continu sans bouchon ou en différé avec bouchon), une barricade doit généralement être construite afin de retenir le remblai. Pour la majorité des mines canadiennes utilisant le remblai en pâte cimenté, les barricades sont au centre des préoccupations en santé et sécurité. Celles-ci sont construites de manière plus ou moins temporaires pour retenir le remblai en pâte cimenté dans sa phase la plus critique, c'est-à-dire la phase dite "hydrostatique" car il se comporte comme un fluide. En effet, en début de remblayage

les pressions développées dans le remblai liquide sont comme celles d'un fluide homogène s'exerçant sur la barricade. Ces pressions varient suite au drainage (consolidation gravitaire) et à l'hydratation de l'agent liant dans le mélange de remblai en pâte cimenté (Thompson et al., 2012).

Cette section présentera tous les types de barricades répertoriées, mais en s'attardant plus spécifiquement sur celles conçues pour retenir le RPC. Le choix d'un type de structure ou d'un autre varie en fonction du type de remblai et plus particulièrement selon la méthode de minage qui dicte la géométrie des chantiers à remblayer. Cette géométrie implique différents volumes qui vont directement influencer le développement de pressions sur la barricade et donc les résistances nécessaires pour retenir le remblai avant qu'il devienne autoportant. Cette section fera aussi un survol des spécifications de construction de chacun des types de barricades.

a) Barricade mince de béton projeté

Ce type d'ouvrage consiste en un cadre composé de barres d'armatures (*rebars*) et de grillages qui retiennent une toile de jute, laquelle est recouverte avec en moyenne 10,5 cm (4 po) de béton projeté. Les éléments structuraux sont les barres et le béton projeté tandis que le grillage et la toile de jute ne servent qu'à la rétention du béton projeté (voir Figure 2-2). Une fois le béton projeté appliqué, une cure de 24 heures est nécessaire minimalement avant qu'une quelconque charge ne soit appliquée. Le type de béton projeté, avec ou sans fibres, varie d'une opération à l'autre (Revell et Sainsbury, 2007b). Lorsque la galerie dépasse une certaine largeur, la construction est faite en forme d'arche pour limiter les risques de rupture au centre de la barricade. Nisbet (2003) a estimé que la pression maximale que peuvent supporter ces ouvrages est de 300 kPa pour les barricades droites et 500 kPa pour celles en arche, valeurs étrangement basses. Des tests non complétés à la mine Mount Isa en Australie ont donné des valeurs de pression hydrostatique jusqu'à 300 kPa avant la fin des tests en raison d'un surplus d'eau dans la galerie de soutirage (Kuganathan et Neindorf, 2005). Des essais sous terre plus poussés ont en revanche démontré que ces barricades pouvaient supporter des pressions supérieures. Une pression horizontale maximale de 1890 kPa a été mesurée (Dehn et al., 2007). La majorité des déformations et des contraintes est prise en charge par les barres d'armature. Revell et Sainsbury (2007a) ont démontré que la résistance de ce type de barricade est largement dépendante de l'installation (ancrage dans le plancher, toit et les murs) des barres d'armatures. La barricade de béton projeté est plus largement utilisée pour les mines qui utilisent l'abatage par chambre remblayée comme la résistance de ce type d'ouvrage est

nettement plus basse. Revell et Sainsbury (2007a) mentionnent aussi qu'en raison de la minceur de l'ouvrage, il est parfois difficile d'étanchéifier les contours qui peuvent être appuyés sur des sections de murs fracturés et c'est souvent le point faible des barricades minces de béton projeté.

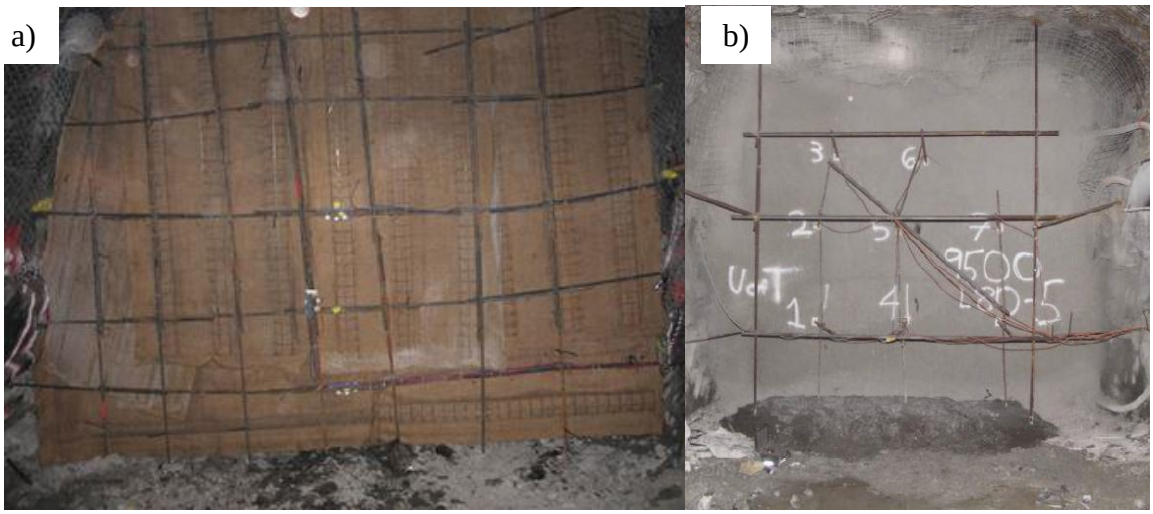


Figure 2-2: a)Barricade mince de béton projeté avant que le béton soit mis en place, tirée de Revell et Sainsbury (2007a). b) Barricade de béton instrumenté (Grabinsky et al., 2011).

Les barricades construites par compagnie Barrick Gold Corporation ont en général un facteur de sécurité minimum de 1,6 (Andrews et al., 2010). Selon ces auteurs, plusieurs designs ont été testés par cinq des mines australiennes de Barrick en opération et le meilleur concept, en tenant compte de la résistance et du temps d'installation, serait la barricade avec armature en acier préfabriqué ajustable. Par contre, les auteurs mentionnent aussi que certaines de leur opération utilisent des barricades minces de béton projeté pour retenir le remblai en pâte avec armature d'élingues attachés sur des ancrages en œillets. Les croquis reproduit à partir des descriptions est représenté à la Figure 2-3 et à la Figure 2-4. Les auteurs soutiennent que ces deux types d'ouvrage peuvent supporter des valeurs de pressions horizontales du remblai comprises entre 340 et 500 kPa dans des galeries de soutirage de dimensions carrées de 3,5 à 6 m. Pour les structures d'aciers préfabriquées, une fois le cadre ajusté, une toile de jute est rajoutée du côté aval de la structure. C'est sur cette toile que le béton projeté est appliqué.

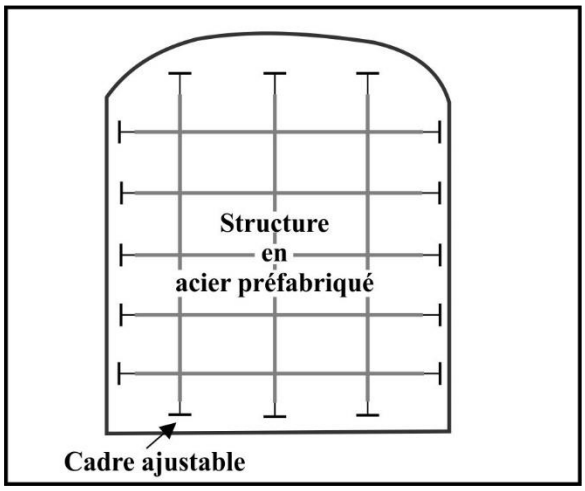


Figure 2-3: Croquis des barricades de béton projeté avec cadre ajustable, adapté de Andrews et al. (2010).

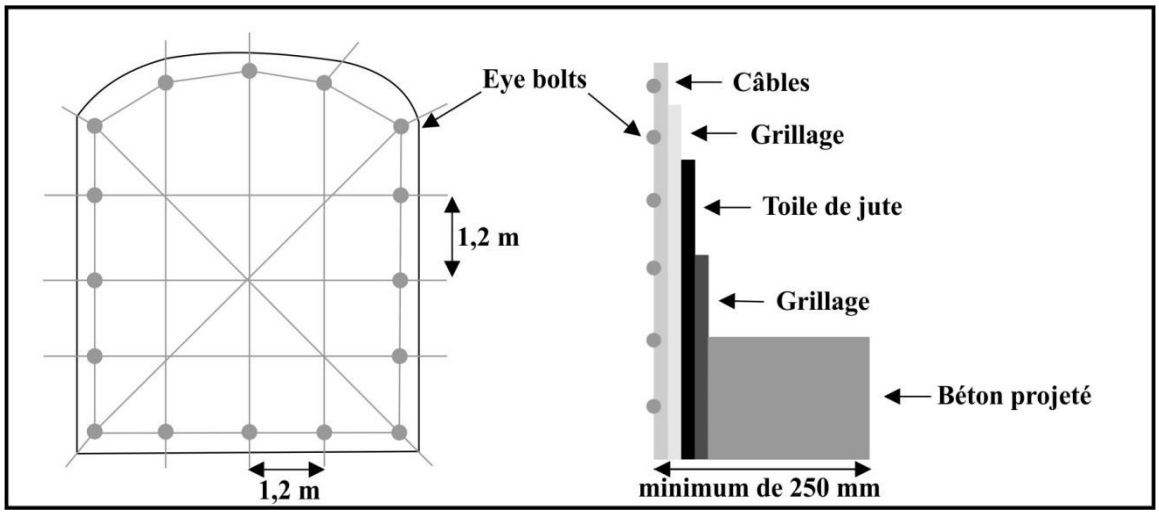


Figure 2-4: Croquis d'une barricade mince de béton projeté avec élingues comme support (vue de face et en coupe) adapté de Andrews et al. (2010).

L'une des différences importantes entre les barricades de béton projeté pour le remblai hydraulique par rapport à celles pour le remblai en pâte, c'est la présence de tuyaux de drainage dans la barricade pour le remblai hydraulique. Cela permet de faire un suivi de l'eau qui s'accumule sur le sommet de la colonne de remblai, l'opération de remblayage étant arrêtée si cette hauteur dépasse un certain niveau. Une attention particulière doit être portée à l'épaisseur réelle appliquée de béton projeté sur ces barricades par les opérateurs. Selon Archibald et al. (2009), l'épaisseur du béton projeté est de 20 à 35 cm dans les mines canadiennes. Les auteurs mentionnent aussi qu'en

général ce type de barricades permet de retenir un bouchon de pâte jusqu'à des hauteurs de 1,5 à 3 m au-dessus du niveau de l'épaulement et que la cure du bouchon peut varier de 0,5 à 3 jours.

Un avantage certain de ce type de barricade, c'est qu'il occupe très peu de place dans une galerie de soutirage; ce qui veut dire que parfois, lorsque l'espace est limité, il peut être très avantageux. En effet, sans avoir à les déplacer, du forage de production peut être fait pour un chantier en-dessous pendant la cure du RPC (Moerman et al., 2001).

b) Barricade de stériles rocheux

Ce type d'ouvrage est très peu documenté bien qu'il soit de plus en plus celui de prédilection dans les mines canadiennes (Li, 2013b) et québécoises qui remblaient avec du remblai en pâte cimenté (ex. Bracemac-Mcleod de la compagnie Glencore, Casa Berardi de la compagnie Hecla Québec, Éléonore de la compagnie Goldcorp, Goldex et LaRonde de la compagnie Agnico Eagle, Langlois de la compagnie Nyrstar et Westwood de la compagnie Iamgold). Ce type de construction est plus simple que les autres méthodes présentées et plus rapide (Yang et al., 2014). Le matériau utilisé pour la construction est du stérile tout-venant qui est récupéré du développement et réutilisé pour la construction. La chargeuse-navette dépose le stérile dans une galerie à barricader, puis pour réussir à boucher la galerie, l'utilisation d'une plaque de poussée (*push-plate*) est nécessaire comme montré à la Figure 2-5. Dans certaines opérations, ces mêmes plaques de poussée sont utilisées pour boucher l'espace supérieur des chantiers « tigh-fill » remblayés avec du remblai rocheux cimenté (Driscoll, 1997).

Lors de la construction de ces barricades, la possibilité de bien fermer l'espace entre le sommet de la barricade et le toit demeure le point critique et peut s'avérer difficile (Evans et al., 2007), surtout selon la géométrie de la galerie à boucher. Dans bien des cas, les barricades sont détruites une fois le remblai devenu autoportant. Les barricades de stériles sont les plus rapides et les plus simples à détruire. Le même équipement (chargeuse-navette) ayant servi à sa construction et la totalité du matériau la composant peuvent être réutilisés pour la construction d'une nouvelle barricade (Sveinson, 1999).

Figure 2-5: Utilisation d'une plaque de poussée placée dans un godet de chargeuse-navette (photo prise à la mine LaRonde).

Le matériau qui compose les barricades de stériles est le même que celui utilisé pour fabriquer du remblai rocheux sec ou cimenté. Bien qu'il arrive que ce ne soit pas le cas, comme dans le cas de la mine Goldex (Doucet, 2014) en général, une couche de béton projeté, de 7,5 cm (3 po), est ajoutée sur le côté aval de la barricade. Un exemple de ce type d'ouvrage est présenté à la Figure 2-6. Certains auteurs (Li et Aubertin, 2011a et b; Li et al., 2009; Yang et al., 2014) avancent même que son utilisation réduit l'empreinte des stériles en surfaces. Mais toutefois, du point de vue opérationnel, ces barricades sont souvent soutirées une fois que le RPC devient autoportant et les tonnages en question sont minimes, donc cet avantage n'est pas réel. La résistance ultime de ces barricades n'a jamais été mesurée, mais on sait que les pressions maximales mesurées au-devant d'une barricade sans rupture sont de 600 kPa (Doucet, 2014). Finalement, ce type d'ouvrage permet un excellent drainage, en tenant compte des ouvrages dont la face aval n'est pas complètement recouverte de béton projeté; ce qui permet de maximiser les gains de résistance à court terme pour le remblai. La perméabilité des barricades de stériles est évaluée à entre 10^{-3} et 10^{-1} cm/s (Li, 2013b).

Figure 2-6: Barricade de stériles avant le placement de béton projeté (photo prise à la mine LaRonde dans le chantier 266-20-131B).

c) Barricades de stériles composites

Grâce aux témoignages recueillis par d'anciens ingénieurs et mineurs, il est possible d'affirmer que les mines Doyon et Louvicourt utilisait des barricades de stériles de type mixte. En effet, un premier empilement de stériles est placé sous l'épaulement et plutôt que d'utiliser une plaque de poussée, le dernier vide entre la barricade et le toit était bouché avec des matelas de 0,2 m (8 po) d'épaisseur. Une fois les matelas bien ancrés, du béton est projeté sur le côté aval de la barricade pour bien sceller le haut de la barricade. La Figure 2-7 permet de voir en photo ce genre de matelas très peu commun pour la construction de barricades, mais qui sont utilisés pour la construction de murs de ventilation. Comme leurs coûts sont très élevés (environ 120 $ la pièce), il est peu probable que leur utilisation pour la construction de barricades mixtes devienne courante (Thibault, 2015). De plus, ce type de construction nécessite que les mineurs soient souvent exposés très proche de l'épaulement des chantiers afin d'ancrer les matelas.

Figure 2-7: Matelas utilisés pour la construction de mur de ventilations ou jadis pour boucher le haut des barricades de stériles à la mine Louvicourt (photo prise dans une baie de matériau au niveau 114, à la mine LaRonde).

Un autre type de barricade de stériles mixtes est celui utilisé à la mine Cannington en Australie. Un premier empilement de stérile (entre 5 et 10 m à la base) est placé dans la galerie de soutirage et le vide laissé au toit (pas d'utilisation de plaques de poussée) est bouché en plaçant des sacs d'Aquacrete (voir la Figure 2-8). Au départ, du béton projeté avec fibres était utilisé pour renforcer l'empilement de sacs en aval de l'empilement, mais le béton a complètement été délaissé plus tard. L'opération rapporte des fuites mineures lors de chaque coulée sans conséquence sur la stabilité de l'ouvrage (Skeeles, 1998).

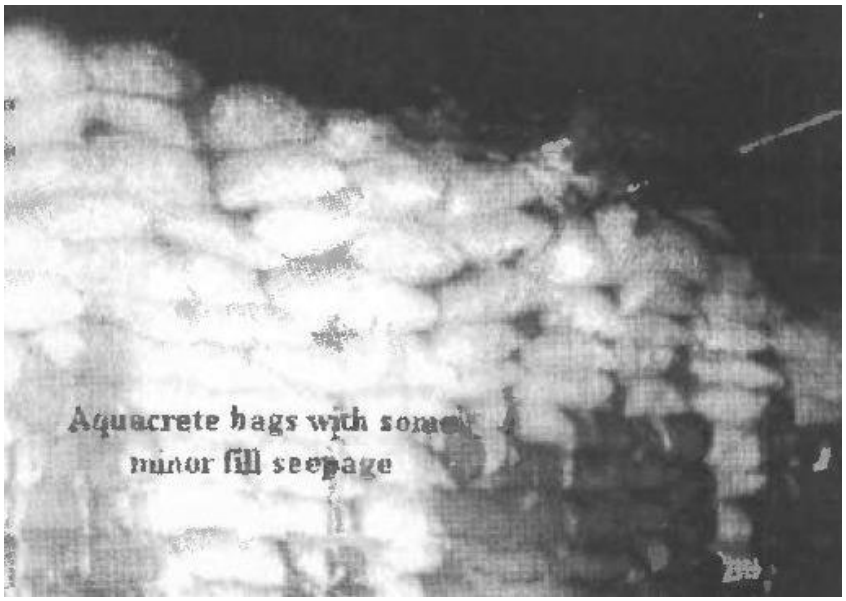


Figure 2-8: Partie supérieure de la barricade mixte bouchée avec des empilements de sacs d'Aquacrete (Skeeles, 1998).

D'autres utilisations de stériles sont possibles dans la construction d'ouvrage de retenue et on obtient différents types de barricades « mixtes ». Dans les recommandations sur le design de barricades minces de béton projeté, Revell et Sainsbury (2007b) suggèrent d'ajouter en aval, à quelques mètres de ces ouvrages un empilement de stériles. Cet empilement a pour rôle de ralentir la pâte en cas de rupture de barricades de béton projeté, en plus de pouvoir contenir d'éventuelles fuites mineures. Hughes (2008) mentionne quant à lui que certaines barricades minces de béton projeté dont on soupçonne de hautes valeurs de pressions peuvent être renforcées en ajoutant un empilement de stériles sur le côté aval de la barricade. La tendance semble pointer vers l'utilisation de plus en plus importante des stériles dans la conception d'ouvrages de retenue temporaire.

2.1.3 Retour sur les types de barricades les plus utilisés dans les mines souterraines

En mettant en contexte ces différents types d'ouvrages de retenues dans un contexte minier souterrain actuel, deux types de barricades émergent comme plus avantageuses soit les barricades minces en béton projeté et les barricades de stériles rocheux. Le Tableau 2-1 résume les principaux avantages et inconvénients de ces ouvrages. Le principal avantage des barricades de stériles est au niveau des coûts moins importants pour la matériel et la construction tandis que les barricades de béton projeté permettent d'utiliser moins d'espace en étant plus uniforme et standardisés.

Tableau 2-1: Résumé des principaux avantages et inconvénients des principaux types de barricade

	Barricade mince en béton projeté
Avantages	- Rapidité d'installation et uniformité de l'ouvrage ; - Résistance acceptable ; - Requiert très peu d'espace ; - Utilisation répandue et armatures préfabriquées disponibles ;
Inconvénients	- Sensible à la qualité du massif rocheux ; - Sensible à une mauvaise installation ; - Mobilise un équipement de béton projeté très en demande ;
Utilisations	- Tout type de remblai.
	Barricade de stériles
Avantages	- Utilisation de stériles qui n'ont plus besoin d'être remontés en surface ; - Minimum de main d'œuvre et de matériau requis ; - Géométrie hautement modifiable et constituants réutilisables ; - Permet un bon drainage ;
Inconvénients	- Grande incertitude sur la résistance car peu de documentation ; - Risque de rupture due à l'hétérogénéité importante des stériles ; - Mobilise généralement un équipement de béton projeté très en demande ;
Utilisations	- Tout type de remblai, excepté hydraulique.

2.2 Mécanismes de ruptures des ouvrages de retenues du monde minier

Les différents modes de rupture possibles des barricades pourraient être :

a. Par érosion régressive à l’interface bouchon/encaissant ;

b. Par érosion de surverse ;

c. Déplacement de blocs de roches stériles, due à effondrement majeur.

Les méthodes pour évaluer la performance d’une barricade sont : les méthodes analytiques, les modèles numériques et l’évaluation en fonction de l’expérience de terrain. Les modèles analytiques sont basés sur de nombreuses hypothèses et de simplifications, entres autres au plan de la géométrie de l’ouvrage et de l’interface roche/barricade, ce qui ne permet pas une confiance aveugle de ces modèles (Berndt, Rankine et Sivakugan, 2007). Les modèles numériques peuvent simuler la distribution des forces de manière plus réaliste et demandent moins de simplifications

que les modèles analytiques. Cependant, ces modèles échouent à tenir compte de l'hétérogénéité des propriétés des matériaux utilisés et de la spécificité des galeries dans lesquelles les ouvrages sont construits (morphologie des parois, présence de grillages, fractures, etc.). La méthode basée sur l'expérience semble être la méthode qui est la plus répandue dans l'industrie minière puisqu'elle tient compte des particularités de chacune des opérations et s'adapte rapidement en fonction des performances observées. Cette méthode permet aussi de s'ajuster en fonction des travaux effectués à l'aide d'équations analytiques et de modèles mathématiques. La faiblesse principale de la méthode basée sur l'expérience, c'est que les informations qui sont compilées par chacune des opérations sont rarement partagées.

Bien que ce mémoire se concentre principalement sur les barricades de stériles, un survol de plusieurs autres ouvrages souterrains sera abordé pour compenser le manque de références spécifiques aux barricades de stériles. Les prochaines sections porteront sur les types de ruptures de barricades de stériles, sur les mécanismes de ruptures de ces ouvrages, sur la mitigation du risque de ruptures et sur le dimensionnement des barricades de stériles.

2.3 Rupture des barricades de stériles

Bien qu'aucun ouvrage ne se consacre spécifiquement aux types de rupture possible dans le cas des barricades de stériles, il est possible d'en proposer au moins quatre mécanismes en s'inspirant notamment de ce qui a été observé pour les digues de barrages: rupture par érosion externe, rupture par érosion interne (érosion régressive), rupture par instabilité externe, rupture par liquéfaction et rupture à la suite l'érosion de surverse.

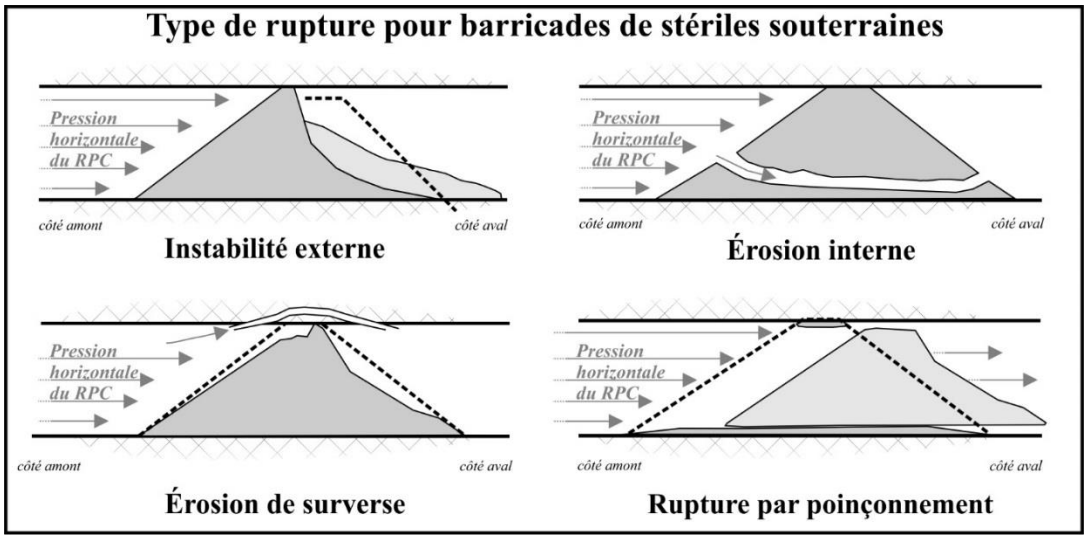


Figure 2-9: Quatre types de rupture possibles proposés pour les barricades de stériles rocheux.

L'érosion externe, l'instabilité externe et la liquéfaction semblent relativement peu probables, à noter ici que ces mécanismes de ruptures sont inspirés des mécanismes de rupture de digues et barrages. L'érosion interne et l'érosion de surverse sont probables surtout en raison des phénomènes de drainage du RPC. L'érosion de surverse pourrait être notée à temps par une inspection rigoureuse de la galerie dans laquelle une barricade sera construite. L'érosion interne (similaire à l'effet Renard) pourrait être empêchée par l'ajout de béton projeté sur la face aval. Pour ce qui est de la rupture par poinçonnement ou glissement, c'est celle qui doit être évitée par un calcul rigoureux de l'épaisseur d'une barricade de stériles en fonction des pressions anticipées dans un chantier rempli de RPC.

2.4 Mitigation des ruptures d'ouvrages de retenues souterrains

Bien que les travaux d'Aubertin et al. (2002) soient associées aux digues en surface, certains aspects peuvent être appliqués aux barricades de stériles notamment concernant l'effet Renard. Cet écoulement d'eau à l'intérieur d'un ouvrage entraîne les particules fines et avec le temps, il se forme un conduit dans le corps de l'ouvrage. Pour contrôler ce phénomène, il est recommandé de réduire les débits de percolation et le gradient hydraulique, ce qui est difficilement réalisable en pratique. Si un chemin de moindre résistance comme une fissure, des voies de percolation ou des zones lâches sont présentes dans l'ouvrage, le phénomène peut être accéléré. Les barricades de stériles sont particulièrement sensibles à l'érosion de contact puisque la faiblesse de ces ouvrages

se situe souvent au contact entre l'ouvrage de retenue et les murs, toit et plancher. La revue de littérature semble démontrer par contre que l'interface barricade/toit est le plus sensible à l'érosion. Dans le domaine de la géotechnique des ouvrages pour la retenue de résidus, se sont la mise en place de filtres qui freine le phénomène d'érosion régressive; pour les barricades de stériles, c'est probablement le béton projeté qui joue ce rôle. Parfois certaines conceptions de barricades de stériles ajoutent même une épaisseur de béton projeté au mileu de l'ouvrage. Dans le cas où un devis de construction de barricades de stériles ne prévoit pas la projection de béton sur le côté aval, une surveillance de l'apparition de signes précurseurs de l'effet Renard sur le côté aval devrait être effectué par du personnel technique qualifié de manière récurrente particulièrement en début de vie utile. L'avantage dans le cas du remblayage en pâte, c'est que le drainage ne dure pas plus de 5 jours, ce qui laisse croire l'apparation d'un effet Renard peu probable.

À la suite de ruptures d'ouvrages de retenue hydraulique dans des mines de charbon, le NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) en collaboration avec le MSHA (*U.S. Mine Safety and Health Administration*) ont évalué en 2006 différentes ruptures d'ouvrages de béton de masse pour la retenue d'eau souterraine dans les mines de charbon ; le potentiel de ruptures de barrages souterrains. Il en ressort que le facteur le plus important à considérer lors de la conception et la construction de ce type d'ouvrages est l'état initial et l'évolution de l'interface barrages et massif rocheux. Il semblerait que toutes les ruptures rapportées dans les mines de charbon américaines sont causées par l'érosion régressive à cette interface. Les fonctionnaires américains recommandent donc une étude géotechnique préliminaire complète, des mesures de mitigation pour limiter l'érosion et un suivi rigoureux de l'évolution des comportements de l'ouvrage. Des calculs adéquats doivent aussi être faits pour estimer les pressions d'eau à stocker pour ainsi bien choisir les matériaux de construction et le type de bouchon. Il n'en demeure pas moins que les calculs des pressions anticipées et la résistance mécanique d'un bouchon (généralement en béton homogène) sont relativement faciles à obtenir. Le défi est clairement au niveau de la roche encaissante dont les propriétés sont hétérogènes et variables dans le temps (Harteis et Dolinar, 2006).

Pour Kirkwood et Wu (1995), la connaissance de l'état du massif rocheux aux pourtours d'un futur site devant accueillir un bouchon est cruciale. Pour limiter le drainage à l'interface, il est recommandé d'enlever tous les morceaux de roches instables (écaillage mécanique), de sceller les

fractures ou failles avec du coulis de ciment ou du béton projeté et de faire un traitement sur les différents murs, planchers et toîts pour diminuer leur perméabilité (ex. béton projeté ou gunite). Il est d'ailleurs recommandé pour les ouvrages permanents de prélever des échantillons *in situ* de roche sur les deux murs, au toit et au plancher pour déterminer la résistance en compression unixiale (UCS) avant la construction. Un test de rupture a été effectué avec une barricade double de briques non renforcée et la capacité maximale de l'ouvrage mesuré a été de 275,8 kPa. Par contre, en tenant compte du drainage aux interfaces, il a été déterminé que cette barricade même avec du coulis injecté ne peut supporter de manière sécuritaire des pressions supérieures à 17,9 kPa si une longue vie utile est considérée. Cette valeur beaucoup plus conservatrice tient compte de la difficulté de bien évaluer la détérioration du point sensible d'une barricade, c'est-à-dire l'interface. Le constat est le même pour les bouchons en béton dont le point faible est en général la résistance mécanique des murs, du toit et du plancher sur lesquels le bouchon est coulé. Un autre aspect important est la difficulté de faire un bon contact entre la barricade et le toit avec un empilement de stériles. En général, comme il se forme des vides au toit suite au tassement des stériels, c'est généralement à cet endroit que le drainage, l'érosion et les ruptures ont tendance à se produire. Le phénomène de retrait du béton lors de la cure diminue aussi l'étanchéité des ouvrages de retenue pour les barricades en béton. C'est pourquoi dans la majorité des cas des ajouts cimentaires sont utilisés afin de limiter ce phénomène. L'injection de coulis et l'utilisation d'ancrages plus longs et solides du côté amont pour augmenter la résistance du massif à cet endroit très sollicité sont recommandées. Un autre aspect à ne pas négliger c'est le risque élevé de plans de faiblesse dans la structure en raison de la présence de joints froids (cold joints) qui ont plus tendance à se retrouver dans des ouvrages souterrains en raison des contraintes logistiques pour amener le béton de l'emplacement de fabrication et de mélange vers l'emplacement de coulée. En résumé, Kirkwood et Wu (1995) rappelent que:

- L'utilisation de support de terrain est recommandé à l'endroit où un bouchon permanent est prévu d'être coulé pour limiter les problèmes d'érosion régressive ;
- Pour limiter davantage de fracturation, il est intéressant de limiter les activités minières à proximité, surtout en début de cure du béton ;
- Il faut faire de l'injection de coulis cimenté de manière très attentive pour ne pas fracturer davantage le massif rocheux au pourtour de l'ouvrage ;

- Une sonde de pression peut être avantageusement installée à l'amont de l'ouvrage pour suivre les variations importantes de pressions ;
- Un tuyau d'évacuation de pression d'urgence peut aussi être installé ; ainsi, dans le cas où les pressions augmentent au-delà des spécifications de l'ouvrage, la pression peut ainsi être controlée. Dans le cas où l'ouvrage subit de la détérioration importante, ce tuyau peut être utilisé pour injecter rapidement du béton ;
- Avoir un plan d'urgence en cas de rupture de barricades ou d'écoulement important du côté aval de l'ouvrage. Ce genre de procédure doit être établi et connu de tous bien avant qu'un événement se produise.

2.5 Compilation des mesures *in situ* dans des chantiers remblayés

Cette section présente différents cas d'instrumentation et de mesures *in situ* prises à l'intérieur de chantiers remblayés avec du remblai en pâte cimenté (RPC) et de certains chantiers remblayés avec du remblai hydraulique (RH). L'étude de ces mesures permet d'obtenir des estimations sur les besoins en résistance mécanique des ouvrages de retenues. Le dimensionnement réaliste des barricades de stériles repose sur la connaissance des pressions horizontales qui se développent dans une galerie de soutirage à l'embouchure de chantiers remblayés qui sont propres à chaque opération. Dans cette section, une tentative a été faite de répertorier les cas d'instrumentation *in situ* disponibles et accessibles dans la littérature. Un tableau de compilation est présenté pour une comparaison plus facile entre les différents projets d'instrumentation, voir Tableau 2-3.

2.5.1 Cas de la mine Fox (Manitoba, Canada)

Cette étude a été conduite par Mitchell et al. (1975) à la mine Fox. La mine Fox est une mine qui a utilisé la méthode long trou et du remblai mixte hydraulique/sable pour extraire du zinc, cuivre, or et argent et a été opérée par Sherritt Gordon Mines Ltd de 1969 à 1985. L'opérateur a choisi des cloisons de 1 m en béton lourdement renforcé pour retenir le remblai puisque les chantiers remblayés étaient très gros (100 m^2 de section par 180 m de haut) et remblayés en continu. À noter aussi la présence de barricades sur les sous-niveaux et du remplissage complet de la galerie de soutirage comme montrée à la Figure 2-10.

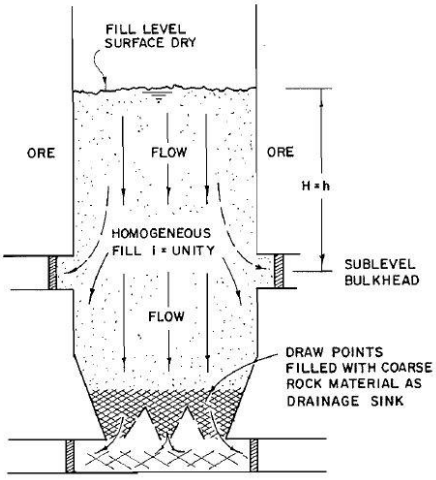


Figure 2-10: Schéma idéalisé en coupe d'un chantier de la mine Fox (Mitchell et al., 1975).

La présence de stériles grossiers dans la galerie de soutirage a permis d'assurer un drainage suffisant et diminuer la pression hydrostatique. Les mesures de pressions ont été prises avec des cellules « sandwich » en caoutchouc avec une précision de 2 kPa. La Figure 2-11 montre que les pressions maximales mesurées ont été bien en deçà de ce qui peut être calculé par le poids des terres. Les valeurs maximales mesurées à la barricade étaient d'environ 100 kPa sur le niveau inférieur.

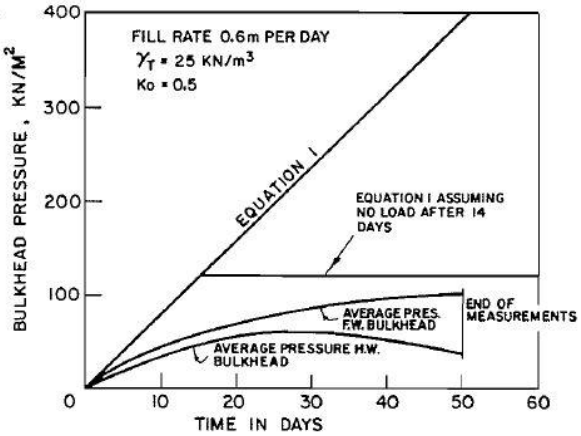


Figure 2-11: Pressions mesurées aux deux barricades instrumentées du même chantier (Mitchell et al., 1975).

À la suite de cette étude, l'utilisation de barricades en cloisons renforcées et bétonnées a été abandonnée et remplacée par des barricades en bois ou en jute. Il est aussi possible d'affirmer

qu’étant donnée la longueur importante des galeries de soutirage, les stériles placés aident certainement dans la dissipation des pressions. Il s’agit peut-être des premiers cas rapportés dans la littérature sur des barricades de stériles rocheux, même si l’empilement rocheux est principalement utilisé ici principalement comme matériau drainant. La seule différence est l’utilisation de barricades en bois ou en jute plutôt que du béton projeté pour fermer le côté aval de la barricade avec des drains.

2.5.2 Cas de l’instrumentation de la mine Chimo (Québec, Canada)

Cette étude a été conduite par Hassani et al. (2001) à la mine Chimo. Trois capteurs de pressions ont été installés dans un chantier remblayé à une profondeur de 20 m et des données ont été prises sur une période de temps de 200 jours. Les chantiers de la mine Chimo sont très gros avec environ 70 m de hauteur, des largeurs de 4 m et 90 m en longueur. Les pressions ont été mesurées selon trois axes et les mesures ont été prises durant le remblayage, la cure et lors du sautage des chantiers secondaires adjacents. Cette instrumentation a permis aussi de mesurer les pressions à l’intérieur d’un chantier durant un épisode de coup de terrain majeur. Le comportement de la roche encaissante a aussi été mesuré (contraintes et déformation) pour calculer l’énergie absorbée par le RPC en cas d’activité sismique majeure. Les pressions maximales mesurées, si l’on néglige celles associées aux sautages et aux événements sismiques, sont transversales d’environ 250 kPa et les verticales au même moment d’environ 200 kPa comme le montre la Figure 2-12 (Hassani et al., 1998). Les données disponibles sont cependant peu nombreuses et aucune mesure précise n’est présentée entre 0 et 20 jours, intervalle au cours duquel, le remblai est dans sa phase dite "hydrostatique" (moment où les pressions interstitielle, longitudinale, transversale et verticales sont égales) et où les pressions sont normalement maximales.

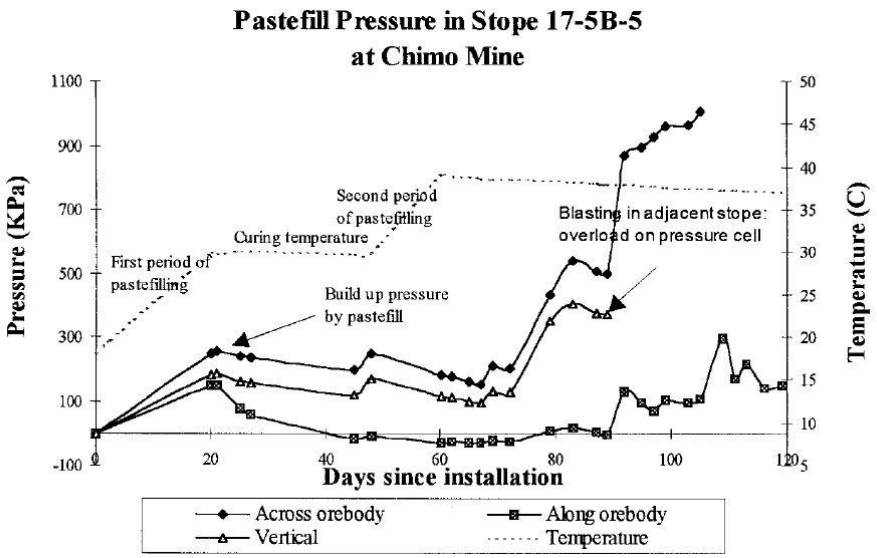


Figure 2-12: Pressions à l'intérieur du chantier 17-5B-5 mesurées à la mine Chimo (Hassani et al., 1998).

Hassani et al. (2001) font référence à la même instrumentation présentée dans Hassani et al. (1998), mais les auteurs rapportent des valeurs maximales plus précises de 245 kPa longitudinalement et de 180 kPa verticalement immédiatement après la fin de la coulée du remblai en pâte cimenté.

L'instrumentation des chantiers remblayés permet de mieux comprendre (indirectement) les processus de gain de résistance et d'aider à prédire les pressions sur les barricades. L'aspect qui est peu étudié est l'utilisation des cellules de pression pour le suivi de l'activité sismique tel que rapporté par Hassani et al. (1998, 2001). Cette activité sismique provient d'une énergie accumulée dans le massif rocheux jusqu'à être libérée soudainement lorsque le point de rupture est atteint. La prévision de ces déchargements de contraintes (coup de terrain) est essentielle afin de garantir la sécurité des travailleurs sous terre. En effet, de la négligence au niveau du suivi serré des activités sismiques peut avoir d'énormes impacts sur les installations, ralentir la production en plus de présenter des risques élevés pour les travailleurs.

Les travaux de recherche de Hassani et al. (2001) ont pour la première fois, tenté de faire un lien entre les activités sismiques et la variation des pressions dans un chantier souterrain remblayé avec du RPC. Entre les jours 140 et 159, moment précédant un événement sismique majeur, les pressions longitudinales ont augmenté d'une valeur de 500 à 1 000 kPa. Selon les auteurs, cette augmentation rapide de 25 kPa/jour dans du remblai curé est un indicateur fiable de la quantité

d'énergie qui était accumulée dans le massif rocheux, signe précurseur d'un futur événement sismique. L'instrumentation de la mine Chimo a montré que les pressions maximales mesurées dans du remblai en pâte cimenté sont dues à de l'activité minière à proximité des chantiers qui force le transfert de contraintes de la masse rocheuse vers le remblai. Cette instrumentation a aussi montré qu'une augmentation rapide des contraintes dans le remblai, alors qu'il n'y avait pas d'activité minière à proximité, peut agir comme indicateur d'un événement sismique en préparation. De plus, les extensomètres placés dans un chantier non remblayé, voisin du chantier remblayé instrumenté, ont mesuré des déplacements de plus d'un mètre. En comparaison, les murs dans le chantier remblayé se sont seulement déplacés d'un maximum de 20 cm. Le remblai en pâte cimenté peut donc être utilisé comme outil de prédiction et comme mesure de protection contre les déplacements majeurs provoqués par les événements sismiques.

2.5.3 Cas de la mine Bouchard-Hébert (Québec, Canada)

Cette étude a été conduite par Zhu (2002) à la mine Bouchard-Hébert qui a extrait du cuivre, du zinc, de l'or et de l'argent entre 1996 et 2005. Dans le cas de son doctorat, Zhu (2002) a instrumenté un chantier de la mine Bouchard-Hébert. Fait intéressant, l'opérateur avait pour objectif d'envoyer 85% des résidus produits sous terre (Dawson, 1995) sous forme de remblai en pâte cimenté, ce qui est bien au-delà du 50% théorique généralement visé (Aubertin et al., 2015). À noter que c'est le pourcentage en poids du minerai qui est vendu qui détermine le pourcentage de résidus qui sera envoyé sous terre. Par exemple, grossièrement, lorsque 30% au moins en poids de minerai est envoyé vers la fonderie, la totalité des résidus peuvent être envoyé sous terre (Brackebush, 1994).

Le chantier remblayé (10-30) a été instrumenté à l'aide de cellules de pressions. La dimension de ce chantier était de 60 m de hauteur, 30 m de largeur et 20 m de profondeur. Deux endroits dans le chantier ont été instrumentés soit le milieu et le bas du chantier (plancher). Les pressions obtenues au milieu du chantier, avec une cage placée sur le plancher du chantier, sont présentées à la Figure 2-13.

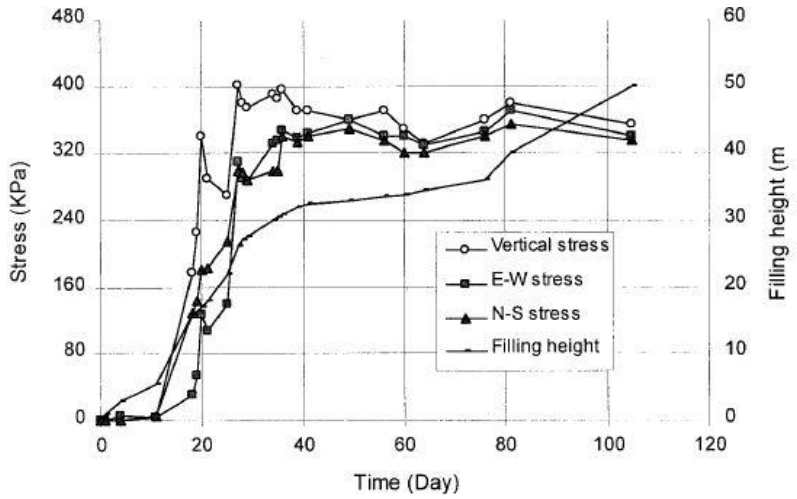


Figure 2-13: Pressions totales mesurées au bas du chantier, mine Bouchard-Hébert, selon 3 axes en hauteur du remblai en fonction du temps (Zhu, 2002).

La pression maximale atteinte a été mesurée verticalement dans le bas du chantier et est de 403 kPa, ce qui est bien en dessous des 1 100 kPa prévus par le calcul du poids des terres. La cage au milieu du chantier a montré des pressions supérieures horizontalement que verticalement laissant supposer le transfert de contraintes du RPC vers le massif rocheux encaissant lorsque l'effet d'arche se produit. Malheureusement, le type de barricade utilisé n'a pas été mentionné, ni les types de mesures qui ont été effectuées.

2.5.4 Cas de la mine Doyon (Québec, Canada)

Cette étude a été conduite par Belem et al. (2004) et Harvey (2004) à la mine Doyon. La mine Doyon a commencé ses opérations au début des années 1980, mais il faut attendre la fin des années 1990 avant que le remblayage des chantiers long trous à l'aide de RPC ne débute, procédure utilisée jusqu'à la fermeture de la mine en 2009. Le cycle de remblayage était généralement constitué d'une première coulée de RPC jusqu'à trois mètres au-dessus du niveau de toit de la galerie, suivi d'une cure de 1 jour et du remblayage résiduel. Le projet d'instrumentation a permis de récolter des pressions dans 3 directions dans deux chantiers (le 12-3 M12N #14 de petite taille et le 8-1 FW de grande taille) à l'aide de 4 emplacements de mesure (plancher de la galerie de soutirage, interface bouchon/résiduel, *footwall* et barricades) dans chacun des chantiers. La Figure 2-14 montre schématiquement l'emplacement des instruments de mesure dans le chantier 8-1 FW.

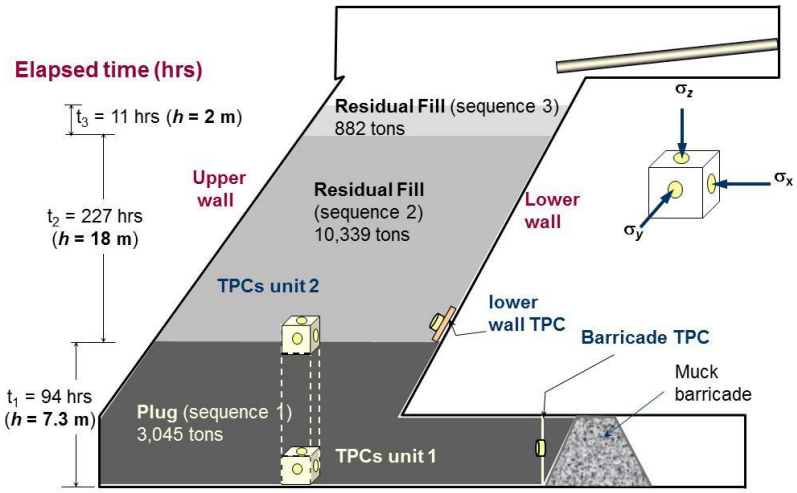


Figure 2-14: Chantier 8-1 FW à mine Doyon, sa géométrie et ses dimensions avec l'emplacement des cellules de pressions, tirée de Belem et al. (2004).

Aucun drainage n'a été observé aux barricades peut-être en raison de la nature très fines (50% des particules de moins de 20 μm) des résidus de la mine Doyon. Les observations rapportées font état de résidus qui demeurent saturés jusqu'à très long terme. Le grand chantier 8-1 FW a des dimensions de 29 m de hauteur, 11 m transversalement et 21 m longitudinalement. Ce sont les pressions longitudinales (150 kPa) mesurées au plancher du chantier qui étaient les valeurs les plus élevées tandis que les valeurs verticales et transversales étaient plus basses et relativement similaires. Les pressions maximales, mesurées dans la galerie de soutirage, étaient d'environ 55 kPa comme le montre la Figure 2-15. Il est possible de supposer que la pression réelle dans la galerie de soutirage devait être légèrement plus élevée étant donné l'élongation des câbles d'aciers sur lesquels la cellule de pression était attachée. Les contraintes ont été obtenues en utilisant les formules fournies par le fabricant et qui sont basées sur les courbes de température (Harvey, 2004).

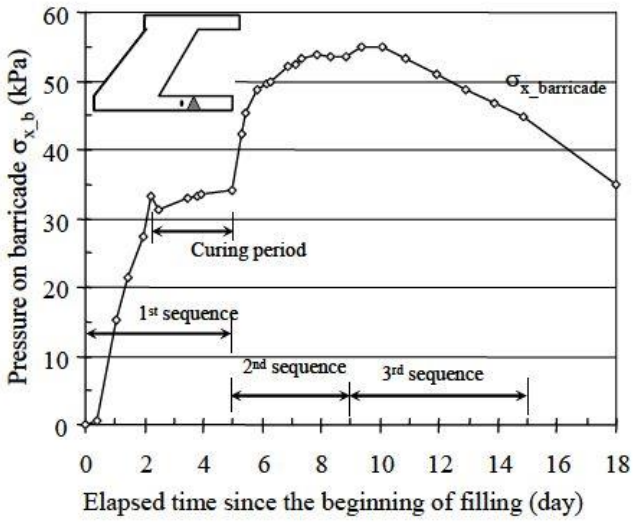


Figure 2-15: Évolution des pressions horizontales dans la galerie de soutirage du chantier 8-1 FW de la mine Doyon (Belem et al., 2004).

Malheureusement, aucun graphique à court terme n'a été présenté pour permette de déterminer la fin du comportement "hydrostatique" du remblai. Une autre observation intéressante c'est que les données présentées ne permettent pas de distinguer une augmentation rapide des pressions associée avec le rinçage de la ligne de remblai; est-il possible que la nature du remblai (résidus très fins), inhibant le drainage, protège du même coup la barricade en empêchant le transfert de pression de la colonne de remblai vers la barricade ?

En parallèle avec cette étude, Belem et al. (2004) ont proposé deux nouveaux modèles 3D pour prédire le développement de pressions dans le remblai en pâte cimenté et les pressions sur les barricades en fonction de la hauteur de la colonne de remblai.

2.5.5 Cas de la mine Williams (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Grabinsky et Bawden (2007) à la mine Williams. Les pressions dans le remblai en pâte cimenté ont été mesurées à l'aide de huit cages instrumentées dans une cheminée Alimak (9415-55) inclinée (70°) avec des dimensions de 150 m en hauteur, de 5 m transversalement et 30 m longitudinalement. Les cages instrumentées contenaient des cellules de pression totale (*TEPC = total earth pressure cell*), des piézomètres, des capteurs de dissipation de chaleur (pression des pores négative), des conductimètres électriques et des inclinomètres. Les pressions dans la cheminée sont demeurées dans la phase "hydrostatique" pendant environ 6 à 8 heures, tandis que les pressions à la barricade (barricade mince de béton projeté) n'ont pas excédé

40 kPa au cours de la coulée (voir Figure 2-16). Le bouchon avait une hauteur de 8 m et après une cure de 8 heures, les 74 m suivants ont été coulés avant un arrêt opérationnel non planifié. Puis les 68 m restants de la cheminée Alimak ont été coulés 36 heures plus tard. Énormément de données n'ont pas pu être récupérées en raison de chute de blocs sur les instruments de mesure des pressions. « Pore P » qui correspond à la pression des pores demeure en deçà des pressions « TP » présente dans le graphique.

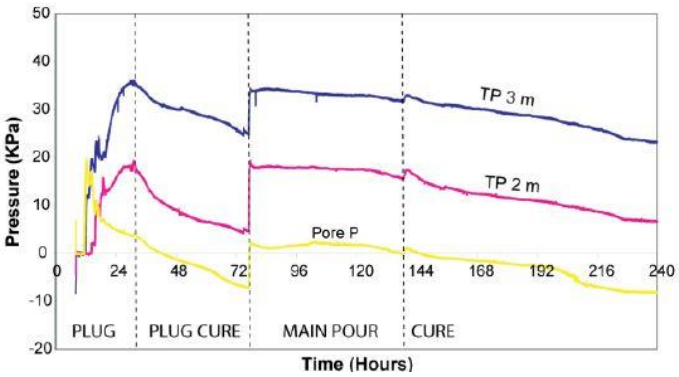


Figure 2-16: Pressions à court terme pour les deux TEPC, chantier 9415-55 (Grabinsky et Bawden, 2007).

À long terme, ce sont les sautages adjacents, les sautages de production, le forage de production et surtout le forage diamanté directement dans le chantier qui ont provoqué les plus grandes augmentations de pressions jusqu'à atteindre 206 kPa (voir Figure 2-17). Cette deuxième figure permet d'observer les variations de pressions et de pressions des pores avec une échelle de temps différente, il est question de jours plutôt que d'heures.

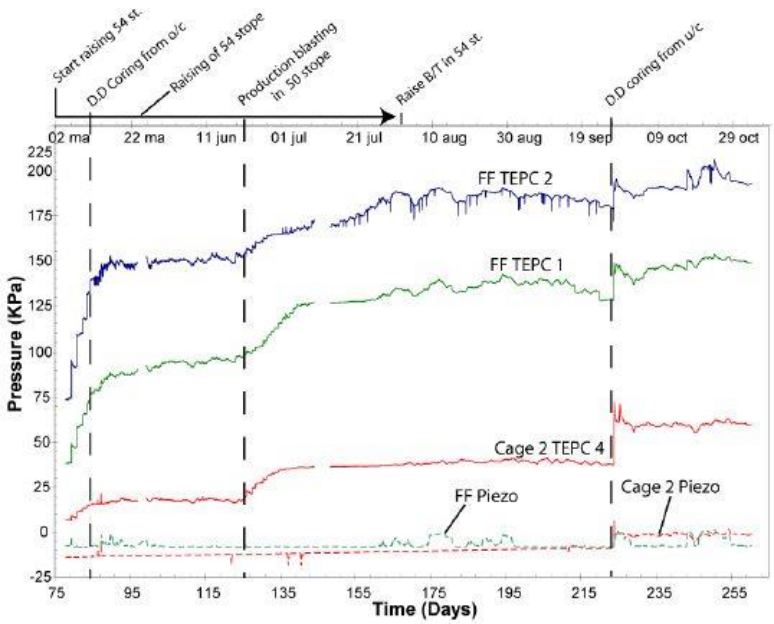


Figure 2-17: Mesure des pressions à la barricade (FF = *fill fence*) et dans la cheminée d'Alimak, chantier 9415-55 (Grabinsky et Bawden, 2007).

Comme un grand nombre de données a été perdu, une nouvelle instrumentation plus réduite, avec deux cages instrumentées directement dans la galerie de soutirage et une barricade instrumentée, a été réalisée dans le chantier 9500-L70-5. Ce chantier avait des dimensions plus conventionnelles de 55 m de hauteur, 18 m de longueur et 9 m de largeur. La coulée de ce chantier s'est faite de manière continue, une première à la mine Williams. Les pressions à la barricade sont restées très basses à la fin de la phase dite "hydrostatique" après environ 6 heures (voir Figure 2-18). On y observe qu'après environ 13 heures, on observe la fin de l'instabilité dans l'augmentation des pressions qui concorde avec les observations indiquant que la galerie de soutirage a terminé d'être remblayée. La chute de température est associée selon l'auteur à l'arrivée de nouveau matériau (eau de drainage) à la barricade. Cependant, une augmentation très nette des pressions a été observée avec le rinçage de la ligne à la fin de coulée, ce qui a doublé rapidement les pressions à la barricade comme le montre la Figure 2-18 passant d'environ 40 kPa à une pointe de 76 kPa. C'est au même moment que les pressions maximales verticales ont été mesurées au niveau du plancher du chantier pour atteindre une valeur de 79 kPa.

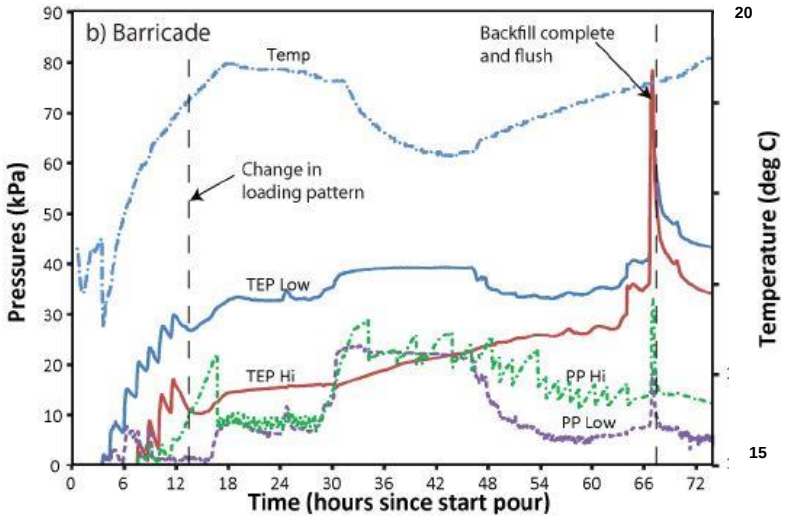


Figure 2-18: Pressions mesurées à la barricade à court terme, chantier 9500-L70-5 (Grabinsky et Bawden, 2007).

Cette étude soulève le point qu'il est intéressant d'évaluer la possibilité de rediriger cette eau de nettoyage ailleurs que dans un chantier fraîchement remblayé pour limiter la possibilité de rupture de la barricade comme cette opération semble être responsable d'une augmentation significative des pressions. Il est à noter que ces pressions baissent très rapidement par la suite, pour se stabiliser autour des valeurs prérinçages puis diminuent tranquillement à mesure que l'hydratation des liants se produit. La réduction de la quantité d'eau de rinçage pour atteindre des valeurs minimales est un sujet qui mériterait plus d'attention pour limiter les pressions aux barricades, diminuer la quantité d'eau à pomper et aussi pour diminuer les risques de rupture dans le système de distribution du remblai.

Selon Lee (2015), lors du rinçage, il est très fréquent d'observer une surpression dans les tuyaux en raison du fait que l'eau a une perte de charge nettement moins grande que le RPC, ce qui veut dire que les pressions augmentent parfois au-delà du maximum de ce que les tuyaux et coudes peuvent soutenir. Selon Nortje et al. (2007), il faudrait même considérer de dévier les eaux de rinçage carrément en dehors des chantiers remblayés pour des raisons de sécurité, même si en pratique, cette recommandation est difficilement applicable.

2.5.6 Cas de la mine Vale Copper Cliff Complex (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Fortin (2008) à la mine Vale Copper Cliff Complex (propriété de Vale Inco) dans la région de Sudbury au nord de l'Ontario. Cette opération comportait une usine pour le remblayage avec du sable et une autre pour le remblai hydraulique. Les pressions ont été mesurées à l'aide de quatre TPC de Roctest placés à différents endroits sur une barricade de béton projeté verticale au bas d'un chantier de RPC. Les pressions maximales mesurées à la barricade ont été d'environ 209 kPa (30,3 psi), mais aucun ajustement n'a été fait pour tenir compte des variations de température. Le chantier avait des dimensions d'environ 105 pieds (32 m) de hauteur. Les valeurs sont présentées à la Figure 2-19.

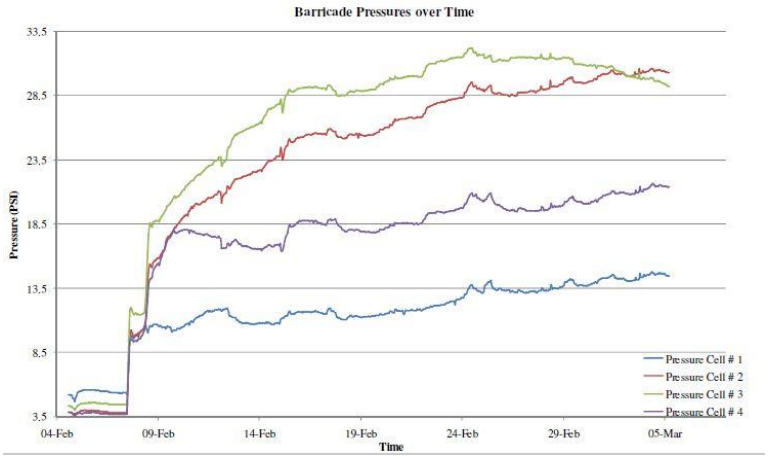


Figure 2-19: Variations des pressions de 4 capteurs en fonction du temps (Fortin, 2008).

La barricade a été construite à l'aide de grillage, de pôles d'aluminium et de béton projeté pour obtenir un mur vertical d'environ 12 à 14 pouces (30,5 à 35 cm). Le projet devait permettre d'instrumenter trois barricades, mais en raison d'une coordination difficile entre l'instrumentation et la séquence de minage, seulement une barricade a été instrumentée. Fortin (2008) mentionne que malgré que l'opérateur utilise des barricades verticales, la minière avait pour habitude de construire un empilement de stériles à l'avant de ses barricades pour dévier les pressions verticales provenant du chantier (technique d'ailleurs utilisée en ce moment à la mine Éléonore de la compagnie Goldcorp). Cette façon de faire, basée sur des observations de terrain, vient renforcer l'hypothèse que la géométrie standard d'une barricade de stériles (en forme de trapèze) permettrait de diminuer les pressions maximales que doivent supporter l'ouvrage. Ce genre de géométrie était connu depuis longtemps dans l'industrie du barrage. La barricade était construite à 4,5 m de

l'épaulement du chantier. L'expérience a aussi montré qu'il est avantageux de ne pas placer la barricade trop près de l'épaulement afin de diminuer les pressions.

2.5.7 Cas no.1 de l'instrumentation à la mine Çayeli (Rize, Turquie)

Cette étude a été conduite par Yumlu et Guresci (2007) et Yumlu (2008) à la mine Çayeli en Turquie. Trois chantiers souterrains ont été instrumentés avec des cellules de pressions totales et des piézomètres à la mine Çayeli. Les dimensions des chantiers étaient en moyenne de 19 m de hauteur, 16 m de largeur et 7 m de longueur. Les pressions verticales et horizontales dans le chantier et directement sur une barricade mince de béton projeté ont été mesurées. Les opérateurs de la mine Çayeli utilisaient un remblayage avec 7% de liant pour les chantiers primaires et un affaissement au cône standard entre 175 et 190 mm (6,9 – 7.5 po). Des barricades de 30 cm d'épaisseur de béton projeté renforcé et avec des armatures de 28 mm attachées à des boulons *rebars* de 20 mm aux murs sont construites. La fréquence de prise des données était aux 5 minutes. Le taux de remblayage était de 0,35 m/heure et seulement un chantier sur les trois chantiers instrumentés a été remblayé en continu. Les pressions mesurées à la barricade variaient entre 50 et 100 kPa, une pression maximale des pores de 100 kPa a été mesurée dans le chantier remblayé en continu comme le montre la Figure 2-20. Tous les résultats sont présentés avec plus de détails dans le Tableau 2-3.

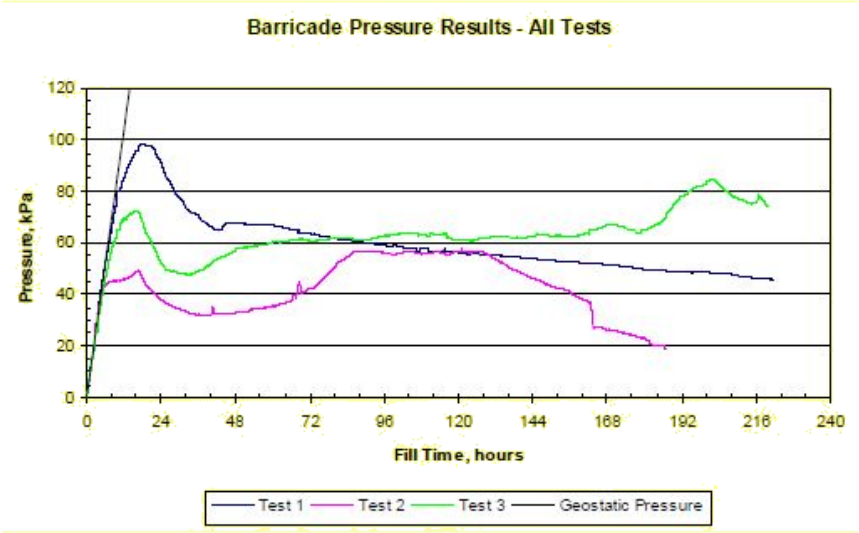


Figure 2-20: Pressions mesurées aux trois barricades instrumentées, le test 1 correspond au chantier remblayé en continu (Yumlu et Guresci, 2007).

Les pressions verticales au milieu du chantier sont plus élevées (90 kPa) que les pressions horizontales (75 kPa). Les pressions horizontales mesurées au milieu du chantier sont plus élevées que les pressions horizontales sur la barricade. Cela est conforme à l'hypothèse qu'une fraction des pressions horizontales soit transmise aux murs, au toit et au plancher de la galerie de soutirage en raison du développement d'un effet d'arche aussi dans la galerie et non seulement dans les murs verticaux du chantier principal. Il est possible aussi que dû à un facteur de frottement lui-même associé à la viscosité et au seuil de cisaillement du remblai, les pressions horizontales soient plus élevées que celles verticales. Une autre hypothèse est que comme l'a montré le Roux et al. (2005), le régime de contrainte dans une colonne de remblai est principalement associé au poids propre du remblai lui-même et une faible proportion de ces contraintes est transférée au massif rocheux encaissant. Ainsi, une fois le remblai autoportant, il est peu probable que les contraintes élevées dans le bas de la colonne de remblai soient transmises à la section du RPC situé dans la galerie de soutirage.

Durant la cure, les pressions n'ont pas été ajustées en fonction de l'augmentation de la température dans le chantier (tributaire possiblement à l'hydratation des liants selon les auteurs). Les résultats montrent que les pressions ont diminué au cours du temps une fois la période de remplissage terminée pour ensuite remonter, probablement en raison de l'augmentation de température. La diminution de la pression des pores est attribuable à l'hydratation du ciment et à la consolidation. L'analyse des mesures montre qu'initialement les pressions sont égales peu importe la direction, et correspondent à une phase dite "hydrostatique". Entre 4 et 10 heures, dépendant du chantier, la dissipation de la pression des pores en raison du début de l'hydratation fait varier les pressions en fonction de l'axe. Le remblai commence à gagner de la résistance au cisaillement au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit. Étant donné que le remplissage en continu, les solides contenus dans la pâte s'appuient les uns contre les autres pour développer une contrainte effective à l'intérieur de la masse ce qui permet de développer l'effet d'arche qui commence à partir de 12 à 20 heures. Yumlu (2008) explique brièvement pourquoi, malgré le fait que les trois chantiers aient été remblayés avec les mêmes recettes et à la même vitesse, les pressions mesurées aux barricades soient différentes. Selon lui, cela est attribuable aux dimensions des chantiers et aux séquences de minage différentes. De plus, le remblayage en continu ne permet pas aux pressions des pores de se dissiper aussi rapidement, ce qui entraine des pressions plus élevées à la barricade.

2.5.9 Cas no.2 de l'instrumentation à la mine Çayeli (Rize, Turquie)

Cette campagne de mesure a été conduite par Thompson et al. (2011, 2012) à la mine Çayeli en Turquie. Deux chantiers (685-N20 et 715-N22) ont été instrumentés avec cinq types d'instruments géotechniques pour mesurer les pressions totales selon trois axes, la température et la pression interstitielle pendant au moins 140 jours. Le chantier 715-N22 est de petite taille, soit de 15 m de hauteur, 15 m de largeur et 8,5 m de longueur, remblayé avec un remblai ayant une faible teneur en liant. Le deuxième chantier (685-N20), nettement plus gros, a des dimensions de 16,5 m de hauteur, 25 m de largeur et 10 m de longueur, remblayé à un taux lent avec du remblai ayant une teneur élevée en liant. Dans le petit chantier, comme les pressions à la barricade ont augmenté très rapidement, le remblayage a dû être effectué en 2 étapes avec un temps de cure de 3 jours entre les coulées. Dans le plus gros chantier (685-N20), comme les pressions à la barricade ont augmenté tranquillement et qu'elles se sont stabilisées, le remblayage a pu se faire de manière continue. L'analyse des données du plus gros chantier a montré la fin de la phase "hydrostatique" du remblai en pâte cimenté entre 12,6 et 14,3 h, alors qu'il a fallu attendre plus de 20 h pour observer la même chose dans le plus petit chantier. Le retard d'hydratation ou encore l'absence de dissipation des pressions interstitielles a ainsi provoqué de fortes pressions à la barricade; ce qui semble montrer que le liant ne joue pas seulement sur la résistance mécanique que développe le RPC. En effet, le liant permet de dissiper les pressions à la barricade lorsque le remblai commence à développer une structure interne en raison de l'hydratation. Un effet d'arche a aussi été interprété dès que la résistance au cisaillement s'est développée; ce qui a permis une diminution des pressions sur les capteurs. D'autre part, les pressions mesurées près des murs, sous l'épaulement et dans la galerie de soutirage étaient plus basses qu'au milieu du chantier pour une hauteur similaire. Ces mesures concordent avec d'autres études et certains modèles numériques, en plus de réitérer l'importance de l'emplacement de la barricade. Le suivi *in situ* en temps réel dans les chantiers a aussi montré que la température, principalement contrôlée par les réactions exothermiques de l'hydratation du ciment, permet de suivre l'évolution de l'hydratation du ciment dans le temps. La température a par contre un impact sur la densité de l'huile contenue dans les cellules de pression, c'est pourquoi les auteurs ont corrigé les valeurs de pression suivant la règle de 0,5 kPa/°C. Thompson et al. (2013) mentionnent que ces ajustements ont été faits suite à des tests réalisés avec des cellules TPC qui ont été plongées dans des bains d'eau chaude pour ensuite les laisser refroidir. La vitesse de remblayage a aussi été corrélée avec l'augmentation des pressions aux barricades. Les prises de

données sur une plus longue période de temps ont montré que les variations de pression à long terme étaient attribuables aux activités de minage à proximité des chantiers.

Dans le petit chantier (715-N22), les valeurs de pressions maximales de 223 kPa dans le remblai ont été mesurées verticalement lors de la deuxième coulée dans la cage située au milieu du chantier. Dans le chantier plus gros (685-N20), les valeurs maximales mesurées sont aussi verticales (184 kPa) au milieu du chantier. Dans les deux chantiers, ces valeurs ont été obtenues avant que le remblai entre dans sa phase "hydrostatique". La Figure 2-21montre quant à elle les pressions mesurées sur une barricade de béton projeté au bas de chacun des chantiers durant le remblayage. Dans le plus gros chantier, remblayé en continu, des pressions maximales d'environ 45 kPa ont été mesurées avec les cellules de pression placées le plus haut sur les barricades. Dans le plus petit chantier qui a dû être remblayé en deux étapes, les pressions maximales mesurées étaient d'environ 100 kPa à la fin de la première coulée sur la cellule de pression au bas de la barricade.

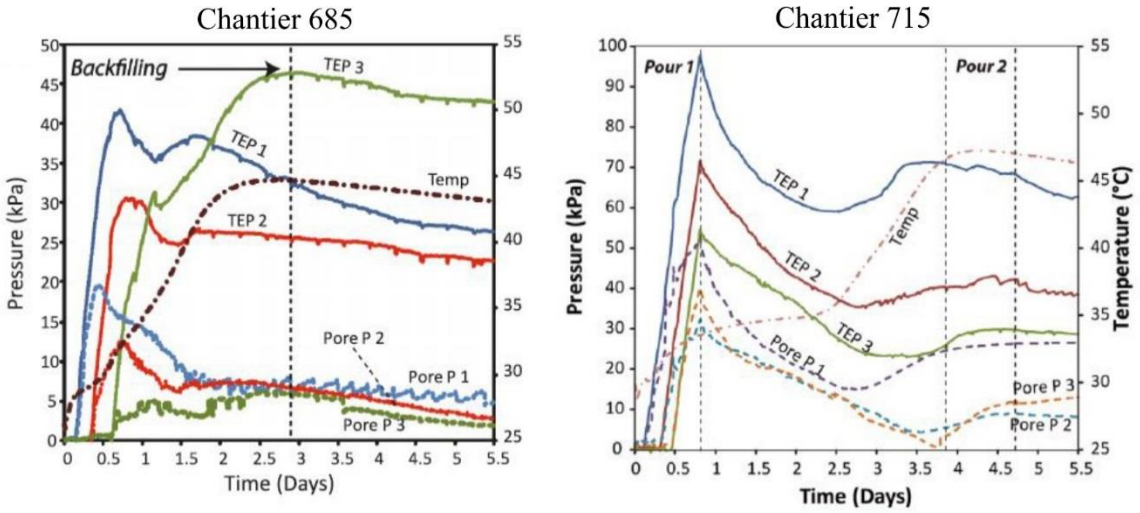


Figure 2-21: Pressions mesurées sur une barricade en béton à la mine Çayeli (B. Thompson et al., 2012).

2.5.8 Cas de la mine Target (Afrique du Sud)

Cette étude a été conduite par Ras et al. (2007) à la mine Target en Afrique du Sud. L'utilisation de barricades de béton aérée TEKSEAL est très peu répandue, c'est pourquoi la mine Target, qui utilise ce type d'ouvrage pour la retenue de remblai en pâte cimenté, a instrumenté de nombreuses barricades et suit un programme serré de contrôle-qualité. Pour les barricades fabriquées à l'aide de TEKSEAL à la mine Target, un renfort en acier a aussi été ajouté aux devis pour obtenir des

résistances supérieures. Avec un rapport eau/ciment de 0,63 et une densité de mousse de 0,74, des tests de résistances ont montré des résistances de 2 MPa après 48 heures de cure. Le TEKSEAL est un produit contenant de nombreux liants et ajouts, mais ce sont les scories (slag) qui se retrouvent en plus grande proportion. Les devis de la mine Target présentent deux murs à deux mètres l'un de l'autre avec armatures d'aciers préfabriquées auxquelles sont attachées des géomembranes. L'espace entre ces deux murs est ensuite rempli de mousse TEKSEAL par un tuyau qui servira une fois le vide rempli de tuyau de drainage. Les chantiers ont en général des hauteurs de 35 m. Comme montrée dans la Figure 2-22 pour une barricade instrumentée au niveau 278 de la mine Target, la pression horizontale maximum à la barricade est de 240 kPa.

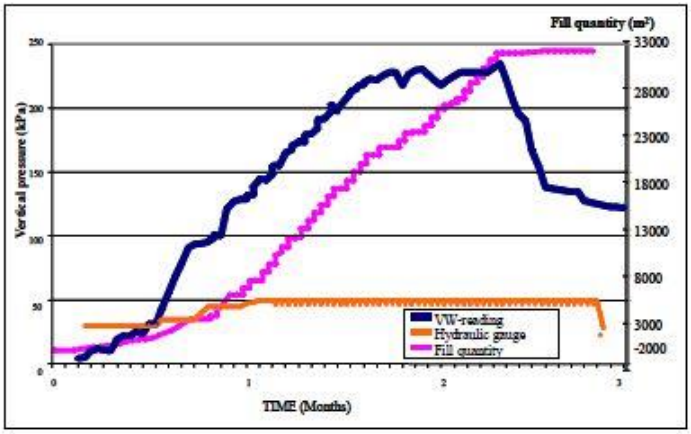


Figure 2-22: Pressions horizontales mesurées à 0,5 m du plancher sur une barricade construite à l'aide de TEKSEAL, chantier 278 WOS 1S (Ras et al., 2007).

Les auteurs de l'article notent que plus d'une centaine de barricades ont été construites sans qu'aucune rupture ne soit rapportée. Les barricades ont aussi résisté à des vibrations majeures causées par des sautages ou des événements sismiques importants.

2.5.10 Cas de la mine Kidd (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Thompson et al. (2009) à la mine Kidd au Canada. La mine Kidd, dont l'instrumentation a été discutée plus haut en rapport aux activités sismiques, a aussi été réinstrumentée en 2009 (Thompson et al., 2009) pour mesurer les pressions dans un chantier long trou et à une barricade. Le chantier (67-SL1) a été instrumenté avec 6 cages contenant chacune 3 cellules de pression totale dans 3 directions et deux barricades en béton ont aussi été instrumentées. Les dimensions du chantier étaient de 32 m de hauteur, par 19 m de largeur et 28 m de longueur.

Le taux de remblayage, facteur clé dans le développement des pressions, était de 0,26 m par heure. La pression la plus élevée mesurée dans le chantier est verticale et d'environ 575 kPa au centre du chantier comme le montre la Figure 2-23. Dans la galerie de soutirage où la barricade est placée, la pression horizontale maximale atteinte était de 246 kPa et de 65 kPa directement à la barricade. Les déplacements mesurés sur les barricades construites de treillis et de béton projeté ont montré des valeurs de 0,90 et 0,55 mm. Les déplacements à la barricade ont stoppé après 4 jours, mais le remblayage a duré plus de 6 jours. Un retrait du remblai empêchant un contact entre le remblai et les capteurs est la première explication pour justifier l'arrêt total de mesure des déplacements. Selon l'auteur, ce retrait est la conséquence de la perte de chaleur plus rapide et plus marquée dans le remblai exposé à la roche encaissante dans la galerie par rapport au remblai dans le chantier lui-même. Une deuxième explication, c'est la reprise des pressions par le squelette du remblai nouvellement autoportant due à l'hydratation qui reprend totalement les pressions inhibant le transfert de ces pressions au remblai dans la galerie de soutirage.

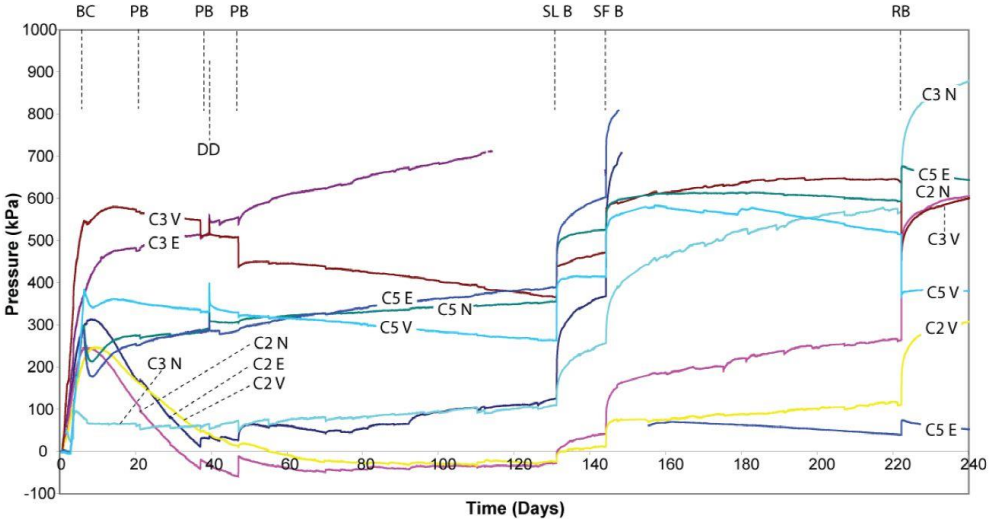


Figure 2-23: Pressions totales mesurées sur 240 jours. Les évènements marquants sont indiqués : fin du remblayage (BC), sautage de production (PB), forage diamanté dans le chantier (DD), sautage primaire dans le chantier au-dessus (SL B), sautage final dans le chantier (SF B) et événements sismiques de magnitude 3,8 avec épicentre à 190 m (RB) (Thompson et al., 2009).

La mesure des pressions à très long terme a montré que les pressions maximales mesurées lors de la coulée du remblai peuvent être largement dépassées dans un même chantier à cause des activités minières à proximité. Les sautages de production dans des chantiers voisins, la convergence des

murs et la déformation régionale sont toutes des raisons. Cette pression a, dans le cas des mesures prises dans deux chantiers à la mine Kidd, dépassé la plage de sensibilité des capteurs. Dans le bouchon contenant 4% de liant, la pression interstitielle a rapidement diminué après moins d'un jour et les pressions totales ont rapidement évolué après la phase "hydrostatique". Dans la partie résiduelle qui a été remblayée avec 2% de liant, la pression interstitielle et les pressions totales sont demeurées élevées pendant 2 jours, puis ont augmenté jusqu'à la fin de la période de remblayage. Ces différences de comportement sont attribuables, selon les auteurs, à la différence de pourcentage de liants qui joue un rôle important dans les processus d'hydratation et donc dans la distribution des pressions dans les chantiers de remblai en pâte cimenté. Au niveau de la barricade, les pressions interstitielles très basses concordent avec les observations de drainage à travers la barricade. Ce drainage semble expliquer les pressions basses mesurées. Le drainage doit donc être suffisant à travers la barricade pour permettre de diminuer les risques de ruptures de barricades. La réduction des pressions mesurées plus on s'éloigne de l'épaulement serait attribuable à l'effet d'arche qui se produit aussi dans les galeries et est conforme avec, entre autres, Mitchell et al. (1975), Smith et Mitchell (1982), Kuganathan (2002) ou encore Li et al. (2009).

2.5.11 Cas des mines Kanowna Bell et Savannah Nickel (Ouest australien)

Cette étude a été conduite par Helinski et al. (2010) aux mines Kanowna Bell et Savannah Nickel en Australie de l'Ouest. Ces auteurs présentent des valeurs de pressions interstitielles et de pressions totales lors du remblayage et la cure de deux chantiers. Il s'agit de chantiers instrumentés dans les mines Kanowna Bell (KB) et Savannah Nickel (SNM). Les auteurs les comparent avec les valeurs prédites à l'aide du code par éléments finis Minefill-2D qu'ils ont développé eux-mêmes. Le modèle est conçu pour s'adapter en fonction de l'augmentation de la rigidité de la matrice du remblai due à l'hydratation et la consolidation, à la réduction de la perméabilité due à l'apparition d'hydrates dans les vides et à la réduction de leur volume due encore une fois à la consolidation. Finalement, le modèle tient compte de la perte de volume qui apparaît en raison de l'hydratation, effet appelé « self-dessiccation ». Cette dessiccation est le résultat du fait que le volume du ciment hydraté est moins volumineux que la somme des volumes des ciments non hydratés et de l'eau utilisée lors de l'hydratation. Ce phénomène a été largement étudié dans le domaine des bétons (Bentz, 1995; Hua et al., 1995; Koenders et Van Breugel, 1997; Powers et Brownyard, 1946) pour expliquer le retrait lors de l'hydratation et peut être appliqué au domaine du remblai en pâte cimenté (Helinski et al., 2006, 2007; Simms et Grabinsky, 2009). Le modèle

permet de tenir compte de nombreux effets parfois contre-intuitifs comme la consolidation (définis dans ce cas-ci comme une réduction de la pression des pores) qui s'avère plus importante si le RPC a une perméabilité plus faible.

Les dimensions du premier chantier instrumenté sont de 40 m de hauteur, par 15 m de largeur et 18 m de longueur. La pression réelle mesurée maximale dans le cas de la mine de Kanowna Bell est d'environ 190 kPa verticalement comme le montre la

Figure 2-24. Dans le deuxième chantier, qui est situé dans la mine Savannah Nickel, les dimensions sont de 23 m de hauteur, par 10 m de largeur et 12 m de hauteur. La pression verticale mesurée dans la mine de Savannah n'est pas mentionnée, en revanche les pressions interstitielles sont nettement plus basses (environ 24 kPa par rapport à environ 100 kPa pour les mesures à 7m dans le chantier, voir Figure 2-25, ce qui permet de supposer des pressions verticales elles aussi plus basses dans la mine Kanowna Bell.

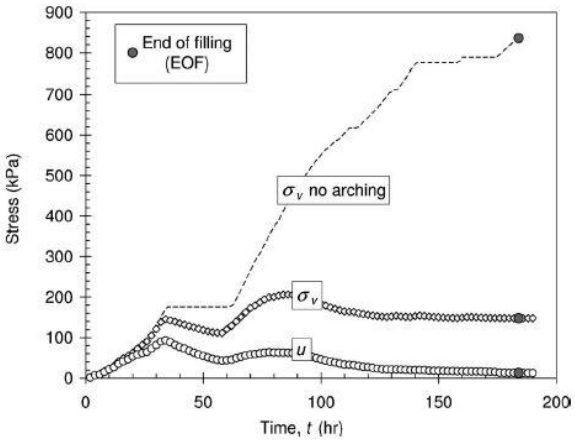


Figure 2-24: Pressions mesurées à 7 m et 17 m dans un chantier de RPC, cas de la mine KB (Helinski et al., 2010).

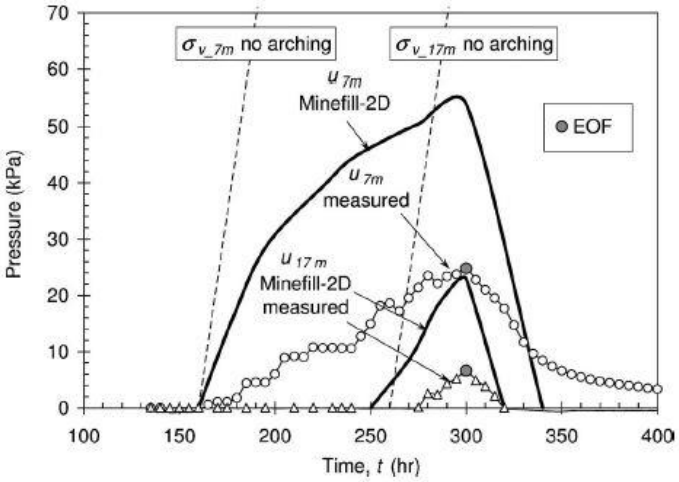


Figure 2-25:Pressions interstitielles mesurées à 7 m et 17m dans un chantier de RPC, cas de la mine SNM (Matthew Helinski et al., 2010).

L'analyse des figures de la pression, mesurée en fonction du temps, montre qu'au début lorsque le RPC est en phase "hydrostatique" (à un temps d'environ 20 h), les pressions interstitielles et les pressions mesurées par les cellules de pression totale sont similaires. Dès que l'hydratation commence, la pression interstitielle a tendance à baisser légèrement alors que l'hydratation du RPC aide au drainage. Une autre observation intéressante c'est que bien que les chantiers soient remblayés en 2 phases, pour permettre une hydratation de la partie « bouchon », dès que la phase 2 de remblayage commence, les pressions verticales et les pressions interstitielles qui au bas du chantier recommencent à augmenter.

Pour la mine Savannah, comme les résidus ont des propriétés différentes, notamment un coefficient de courbure plus bas et un diamètre moyen plus grossier, le drainage est augmenté à travers la colonne de remblai et devient uniquement contrôlé par la capacité de la barricade à laisser drainer l'eau interstitielle. Ainsi, les pressions interstitielles mesurées sont nettement plus basses.

Faits intéressants associés avec ce projet d'instrumentation, les cellules de pression totale ont été modifiées pour ne pas être remplies avec de l'huile, mais plutôt avec de la glycérine et de l'eau pour limiter le potentiel d'expansion due à la température. La simulation a aussi permis de conclure l'importance d'avoir une bonne compréhension des propriétés géomécaniques du RPC de chacune des opérations, d'optimiser la géométrie de la galerie de soutirage pour optimiser le drainage et de

garder un taux de coulée assez faible. Tout cela pour permettre de réduire le temps au minimum où la pression d'eau dans le remblai est élevée et ainsi diminuer les pressions subies par les barricades. Les auteurs rappellent que chacune des opérations minières a ses propres particularités concernant le taux de remplissage, le taux de consolidation et la vitesse d'hydratation, ce qui a un impact majeur sur les pressions qui se développent sur une barricade.

2.5.12 Cas de la mine Red Lake (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Hughes (2008) à la mine Red Lake au Canada. La mine Red Lake exploite son minerai à l'aide de la méthode par abatage chambres remblayées avec du remblai en pâte cimenté. Pour retenir le remblai, l'opération utilise des barricades minces de béton projeté de 4 po (10 cm) avec un squelette de *rebars*. Huit barricades ont été instrumentées à l'aide de cellules de pression et un essai destructif a été effectué. L'essai a permis de déterminer la capacité maximale de ce type de barricade qui était d'environ 130 kPa et que la pression maximale horizontale mesurée était de 50 kPa. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2: Résultats des mesures de pressions et de déformations pour les neufs barricades (Hughes et al., 2010).

Fill fence	Height (m)	Width (m)	Maximum pressure (kPa)	Maximum strain in shotcrete ($\mu\varepsilon$)	Maximum strain in Rebar ($\mu\varepsilon$)
32-826-8	4.5	N/A	50	N/A	N/A
37-746-2	3.9	3.6	N/A	N/A	N/A
34-806-4	3.6	5.35	22.5	2000	N/A
31-806-3	4.25	4.25	20	125	N/A
36-746-1	5.25	12.3	25	−220	N/A
34-806-1	3.7	6.9	40	−375	N/A
34-786-14a	3.4	4.8	14	35	25
34-786-14b	3.85	3.5	19	180	130
Destructive test	2.6	8	127	−50	1100

À la suite de l'analyse des mesures, il semblerait encore une fois que le taux de remblayage de la pâte a un impact important sur les pressions aux barricades et que le moment critique serait lors du nettoyage de la ligne de remblai avec de l'eau à la fin du remblayage. La méthode de remblayage spécifique à Red Lake est de couler le RPC dans les chantiers jusqu'à atteindre une hauteur de 1,5 m qui sera laissé en cure pendant 24 h avant de couler une nouvelle couche. Cette étude avait pour objectif de vérifier si l'augmentation du taux de remblayage pouvait enrayer le phénomène d'apparition de joints froids horizontaux. En rappel, ceux-ci se forment de manière successive et

diminuent la résistance du RPC en plus de causer des chutes de toit dans le cas de l'abattage par chambre remblayée descendante. Dans ce cas le RPC utilisé doit agir comme support de terrain soit au toit, soit au plancher (méthode ascendante ou descendante). Le rapport eau/ciment (100% de ciment GU) était élevé et pouvait atteindre 10%. Cela a pour effet de permettre d'atteindre des résistances mécaniques (UCS) du RPC jusqu'à 2 MPa après 28 jours. L'étude a montré que les barricades de béton projeté, telles que construites dans cette opération, peuvent supporter des hauteurs de 9,5 m de RPC plutôt que 1,5 m. Comme les chantiers ont une hauteur de moins de 9,5 m, le remblayage des chambres a pu se faire suite à cette étude de manière continue et sans période de cure pour empêcher la formation de joints froids horizontaux.

2.5.13 Cas de la mine Coleman (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Thompson et al. (2013) à la mine Coleman au Canada. La mine Coleman utilise pour son remblayage du remblai hydraulique et des barricades en béton projeté dans les galeries de soutirage pour retenir le remblai avant qu'il devienne autoportant. Deux cages instrumentées ont été placées au bas du chantier sur le plancher, la première au centre du chantier et la deuxième directement sous l'épaulement pour obtenir un maximum d'informations à la transition entre un régime de pressions majoritairement vertical et horizontal. La barricade était elle-même instrumentée. Le chantier instrumenté mesurait une hauteur de 30 m. La procédure habituelle était de laisser couler le remblai hydraulique pendant 12 heures pour faire un bouchon. La hauteur de remblai atteinte était d'environ 2,5 m (8 pieds) au-dessus du niveau de la galerie. Une cure de 3 jours permet ensuite un drainage afin de dissiper les pressions interstitielles. Le remblayage est ainsi complété en limitant l'accumulation de pressions à la barricade mince de béton projeté qui a une résistance faible (environ 100 kPa). Du stérile tout-venant est par la suite déversé en même temps que le remblai hydraulique pour terminer le remplissage de la partie résiduelle du chantier. La Figure 2-26 montre les pressions mesurées par la cage au centre du chantier. La ligne horizontale 1 représente l'axe transversal et la ligne 2, l'axe longitudinal. Il faut attendre 6 heures avant que les trois courbes se séparent montrant la fin du comportement "hydrostatique". La courbe des pressions verticales monte plus rapidement que les pressions horizontales. À 5 jours et demi, les montées de pressions varient différemment; ce qui concorde avec le déversement de stériles qui continue de faire augmenter les pressions verticales, mais pas les pressions horizontales, qui elles, restent stables.

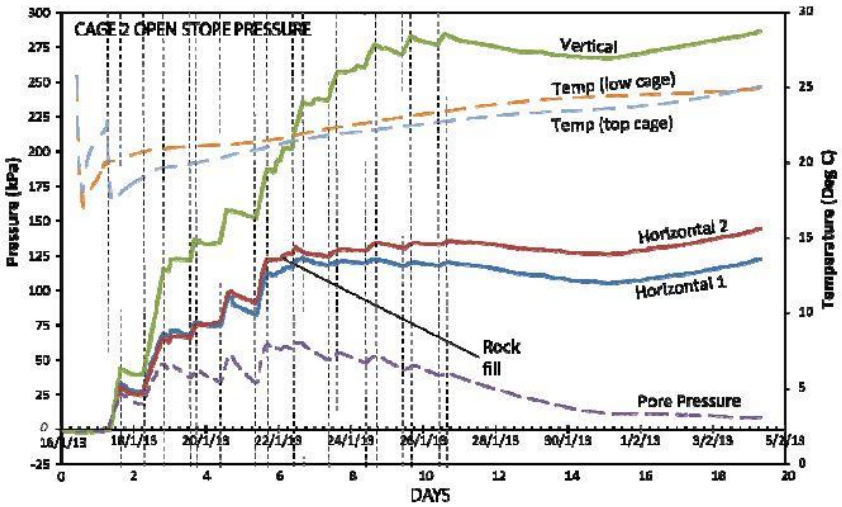


Figure 2-26: Pressions totales (verticales et 2 horizontales), pressions interstitielles et la température mesurées au centre du chantier de la mine Coleman, données prises sur 20 jours (Thompson et al., 2013).

On peut supposer que la cure de trois jours du bouchon dans ce cas-ci, est primordiale pour empêcher le transfert des pressions verticales de la colonne de remblai vers la barricade. Au niveau des pressions verticales au milieu du chantier, elles n'ont jamais cessé d'augmenter jusqu'à la fin du remblayage. C'est à ce moment que les pressions maximales verticales (287 kPa) ont été mesurées (30 m de hauteur de remblai) dans le bas du chantier. À la barricade, les pressions maximales mesurées ont été de 145 kPa au même moment.

2.5.14 Cas de la mine Garson Ramp (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Thompson et al. (2013) à la mine Garson Ramp au Canada. La mine Garson Ramp remblaye ses chantiers avec du RPC depuis 1994, elle est l'une des premières mines canadiennes à avoir adopté ce type de remblai avec la mine Louvicourt. Le remblai coulé dans les chantiers est retenu par des barricades en béton projeté. Comme ce projet d'instrumentation est le même que pour celui de la mine Coleman avec le même opérateur (Vale Inco), l'approche est très similaire. Une fois de plus, une cage est placée au centre du chantier et une autre directement sous l'épaulement ont été positionnées en plus d'instrumenter la barricade. Le chantier instrumenté présente une hauteur de 32 m. Du stérile tout-venant est déversé dans la partie résiduelle du chantier en même temps que le remblai en pâte. Fait intéressant, la mine Garson (100 ans de production en 2008) utilisait déjà le remblayage avec du sable en 1944.

La Figure 2-27 permet d'apprécier des comportements similaires de la distribution des pressions par rapport aux données prises à la mine Coleman, mais montre un drainage plus rapide comme la fin de la phase "hydrostatique" (début des pressions hétérogènes en fonction de la direction) a été observée après seulement 3 heures de cure. L'auteur note qu'un drainage important concordant avec cette interprétation a pu être observé à travers la barricade. La cure de trois jours n'a pas montré une baisse du taux d'augmentation des pressions mesurées, mais semble concorder avec une nette augmentation de la température. La différence entre l'expansion thermique de l'acier des boitiers métalliques des cellules TPC et l'huile contenue dans la cellule peut générer des changements de pressions uniquement associées à la température. L'équipe de l'Université de Toronto n'a pas ajusté les pressions en fonction des variations de température dans cette étude. Des tests d'immersion de cellules dans de l'eau chaude ont permis de montrer des variations d'environ 0,5 kPa par degré, mais dans ce cas-ci on parle presque d'une augmentation de 30 kPa par degré. Des tests de calibrage propres à chacun des types de cellules et de fluides inclus dans celles-ci seraient à faire pour mieux comprendre ce phénomène. En ne considérant pas l'effet de la température, des pressions maximales verticales d'environ 375 kPa ont été mesurées. Fait intéressant, les pressions mesurées à la barricade ne sont pas présentées, mais on peut supposer qu'étant donné des pressions verticales supérieures à celles mesurées dans la mine Coleman, les pressions à la barricade ont certainement été plus élevées que 145 kPa. Aucune rupture de barricade n'est rapportée non plus; ce qui laisse penser à une résistance plus importante que 100 kPa pour les barricades minces de béton projeté.

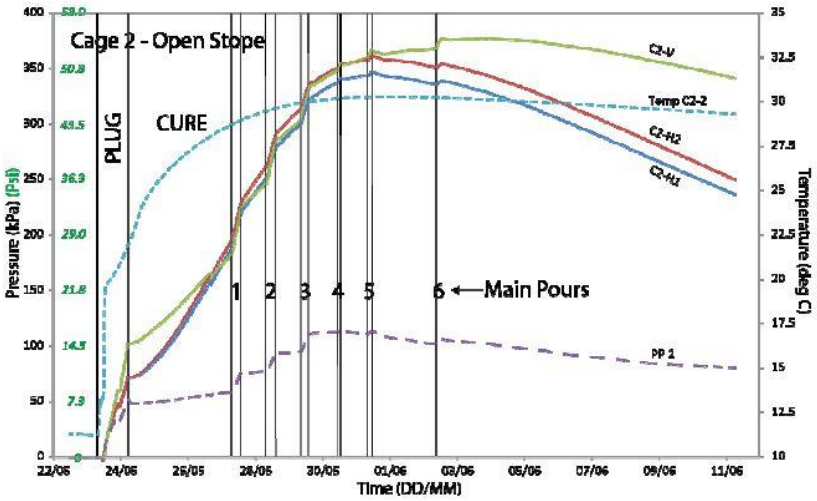


Figure 2-27: Pressions totales (verticales et 2 horizontales), pressions interstitielles et la température mesurées au centre du chantier de la mine Garson Ramp, données prises sur 20 jours (Thompson et al., 2013).

2.5.15 Cas de la mine Goldex (Québec, Canada)

Cette étude a été conduite par Doucet (2014) à la mine Goldex au Canada. Une campagne d'instrumentation de deux chantiers souterrains et de leurs barricades a été conduite à la mine Goldex en 2014. Les chantiers instrumentés avaient des dimensions de 18 m longitudinalement, 30 m transversalement et 50 m de hauteur. La présentation ne spécifie pas l'endroit exact de la prise de mesures de pressions horizontales mais les résultats présentés sont les suivants : 600 kPa, 338 kPa, 295 kPa et 387 kPa. Les pressions mesurées, plus basses qu'anticipées, ont permis de modifier le design des barricades de stériles. Ce nouveau design fait passer les dimensions des barricades de 5 m de longueur au toit avec béton projeté à 6 m de longueur au toit sans béton projeté. Tous les chantiers avec une dimension d'environ 30 m par 30 m sont désormais coulés en continu.

2.5.16 Cas des mines Raleigh et Lafranchi (Australie)

Cette étude a été conduite par Hasan et al. (2014) aux mines Raleigh et Lafranchi en Australie. La mine Raleigh utilise le remblai en pâte cimenté pour remblayer des chantiers long trous et des chantiers par abatage chambres remblayées descendant. La mine Lafranchi utilise elle-aussi du remblai en pâte, mais uniquement pour remblayer des chantiers long trous. Le type de barricade pour ces deux opérations n'est pas mentionné, mais l'étude des photos et schéma indique une

structure verticale mince ce qui indique soit des barricades de béton projeté ou des barricades en briques. La dimension moyenne des chantiers à la mine Raleigh est de 17 m de hauteur, 3,5 m de largeur et 18 m de longueur avec un pendage de 65° des épontes et des volumes d'environ 1 000 m^3. La dimension moyenne des chantiers à la mine Lafranchi est de 41 m de hauteur, 15 m de largeur et 20 m de longueur dans des chantiers qui sont parfaitement verticaux. Pour ces deux opérations, trois barricades sont construites dans trois galeries de soutirage et les chantiers ont des volumes approximatifs de 10 000 m^3. Le taux de remblayage est de 1,7 m par heure pour la mine Raleigh et 0,7 m par heure pour la mine Lafranchi. Le chantier long trous de la mine Raleigh instrumenté a été coulé en deux étapes (bouchon et résiduel), mais celui de la mine Lafranchi, en raison de ses dimensions, a été remblayé en 6 étapes.

Une cellule de pression dans l'axe horizontale et un piézomètre ont été placés au centre du chantier au niveau du plancher (loc. 1) pour la mine Raleigh et l'autre sur la barricade à mi-hauteur (loc. 2). Les pressions horizontales à la barricade sont demeurées autour de valeurs d'environ 30 kPa comme le montre la Figure 2-28.

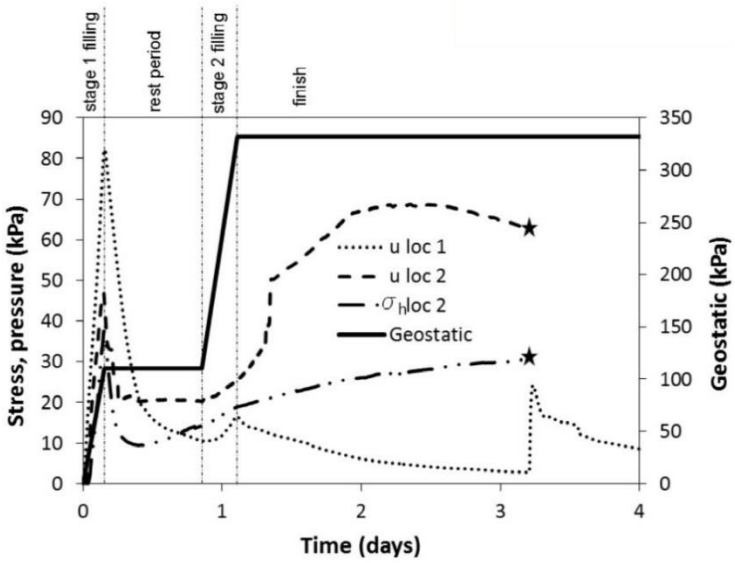


Figure 2-28: Pressions interstitielles (deux endroits) et pression horizontale à la barricade (Hasan et al., 2014).

Dans le chantier, seulement les pressions interstitielles ont été mesurées, elles sont maximales au niveau du plancher dans le cas de la mine Raleigh avec des valeurs d'environ 140 kPa. Pour la

mine Lafranchi, ce sont des valeurs nettement plus basses de 35 kPa qui ont été mesurées au milieu du chantier.

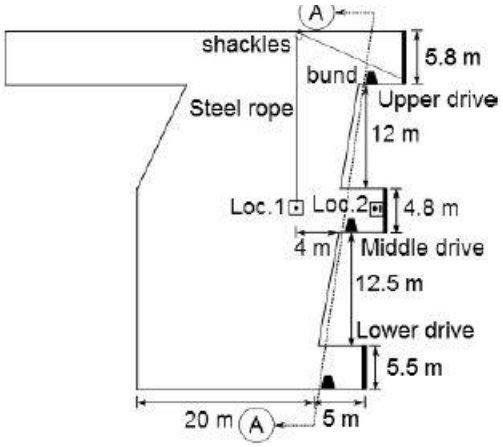


Figure 2-29: Emplacement de l'instrumentation à la mine Lafranchi (Hasan et al., 2014).

Les pressions horizontales mesurées à la barricade sont demeurées sous des valeurs d'environ 40 kPa comme le montre la Figure 2-30 .

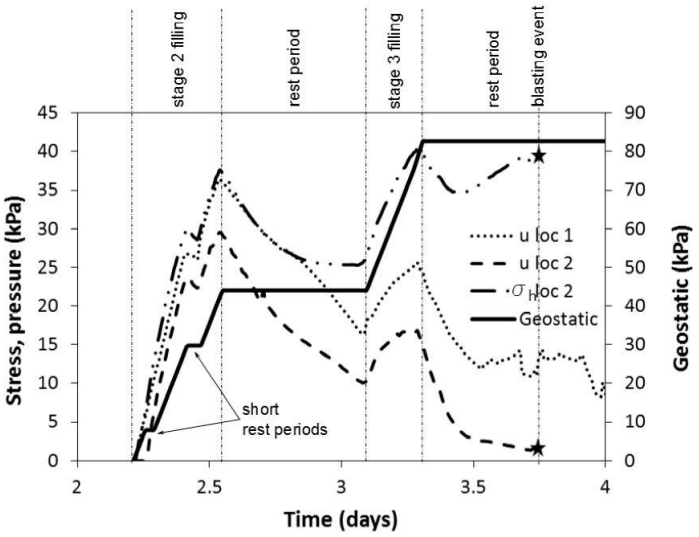


Figure 2-30: Pressions interstitielles (deux endroits) et pression horizontale à la barricade, mine Lafranchi (tirée de (Hasan et al., 2014).

L'instrumentation de ces deux mines australiennes est très limitée et les interprétations que l'on peut en tirer le sont aussi. Vu les pressions très basses qui ont été mesurées, il serait intéressant d'évaluer le remblayage en continu pour la mine Raleigh et de diminuer le nombre de coulées pour

la mine Lafranchi. Néanmoins, une instrumentation plus poussée est à envisager avant de poser davantage de recommandations.

2.5.17 Cas de la mine Kidd (Ontario, Canada)

Cette étude a été conduite par Counter (2014) à la mine Kidd au Canada. Une autre étude récente s'est intéressée à la mesure de pressions dans le RPC en lien avec les activités sismiques. Il s'agit de celle de Counter (2015) à la mine Kidd. Le mécanisme clé générateur d'activité sismique à la mine Kidd semble être associé au mouvement différentiel entre l'éponte inférieure ou *hangingwall* (HW) et l'éponte supérieure ou *footwall* (FW) dans les chantiers. Ces mouvements différentiels entre différents niveaux viennent redistribuer les contraintes régionales et locales amenant de la rotation, du cisaillement et de la relaxation du massif sur de larges zones et qui est le moteur d'événements sismiques majeurs. À la suite de deux évènements sismiques en 2009, causant énormément de dommages (2,2 km de développements latéraux atteints sur 7 niveaux), la mine Kidd a décidé de mandater un consultant pour modéliser ces évènements. La firme retenue a utilisé 8 modèles par éléments finis et différents abaques pour tenter de comprendre les mécanismes à l'origine de ces événements sismiques et optimiser la séquence d'extraction. Le but de cette étude, toujours en cours, est de pouvoir mieux « équilibrer » les libérations inévitables d'énergie du massif rocheux à mesure que le minage se poursuit, mais de manière mieux planifiée et contrôlée. Plutôt que de se baser uniquement sur les données prises par des extensomètres et des sismomètres, le modèle se base aussi sur des cellules de pression enfouies dans des chantiers remblayés. Ainsi, l'opération ne compte plus uniquement sur les traditionnels extensomètres qui dépendent de la stabilité à long terme du massif dans lesquels ils sont installés. Les extensomètres sont aussi sensibles aux déformations locales (mouvements des murs, du toit et plancher) ce qui masque les mouvements régionaux qui pourraient permettre de prévoir une accélération dans les déplacements, signe précurseur d'événements sismiques. De plus, les extensomètres mesurent des déplacements uniquement uniaxiaux bien que les déformations soient en trois dimensions en plus d'être sensibles au cisaillement. La tomographie sismique à l'aide de sismographe mesure quant à elle les variations de la vitesse des ondes P ou S à différents endroits dans une mine et est grandement utile dans la prévision d'événements sismiques. L'analyse des signaux captés en temps réel permet d'interpréter des variations du degré de fracturation et de l'état de contrainte du massif rocheux comme les zones supportant des contraintes élevées (Counter, 2015).

En 2008, une équipe de l'université de Toronto a placé 6 familles de capteurs de pressions orthogonaux avec une sensibilité d'environ 500 kPa pour mesurer le potentiel de liquéfaction de chantiers remblayés avec du RPC. Avec le temps, on s'est rendu compte, que les pressions mesurées permettaient aussi de mesurer : les variations de contraintes régionales, les mouvements du HW et du FW et de mesurer les variations de pressions à la suite des événements sismiques. Les pressions ont atteint des valeurs trop importantes; ce qui a rendu non opérantes ces sondes de mesure de pressions fabriquées pour la mesure de pressions sous les 1 000 kPa. Les opérateurs ont par contre décidé de tester ces équipements pour mesurer des phénomènes d'amplitude de plusieurs MPa. Un nouveau chantier a donc été instrumenté avec des capteurs de pressions adaptés pour des plages de valeurs nettement plus élevées, c'est-à-dire efficace jusqu'à 10 MPa. Le but étant d'utiliser ces capteurs de pressions pour remplacer les extensomètres, qui comme discuté plus haut, ne sont pas représentatifs. Des tests triaxiaux ont aussi été réalisés pour déterminer des valeurs de déformation volumétrique et axiale du RPC à hautes pressions de confinement pour pouvoir calculer les déformations volumiques régionales et leur distribution en fonction des changements de pressions. La Figure 2-31 montre la configuration de l'instrumentation dans la galerie de soutirage avant la coulée du RPC dans une semelle (*sill*) isolée, sans chantier secondaire, parfait pour l'instrumentation.

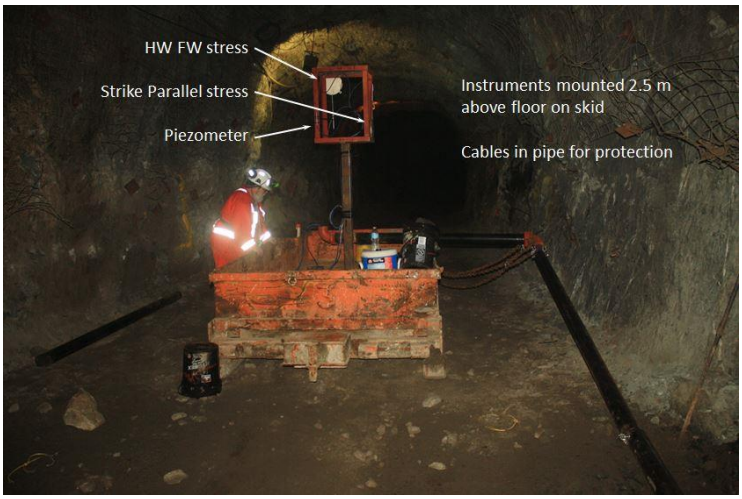


Figure 2-31: Photos de l'installation des capteurs de pression à la mine Kidd (Counter, 2015).

La Figure 2-32 présente l'interprétation des données récoltées pour la période entre le début de l'installation en début 2015 jusqu'à la fin mai 2015. Malgré le fait que les cellules de pression sont placées pour la prédiction d'événements sismiques, elles fournissent aussi des données sur le

développement de pressions dans le RPC. La prise de données se poursuivra dans le temps et cette fois principalement pour tenter de mesurer des variations de pressions laissant présager des évènements sismiques. Les cellules de pression ont aussi permis de valider et calibrer le modèle numérique pour les convergences du HW et du FW. Les pressions maximales mesurées sont verticales et de l'ordre de 400 kPa si l'on néglige les pressions mesurées une fois le remblai autoportant.

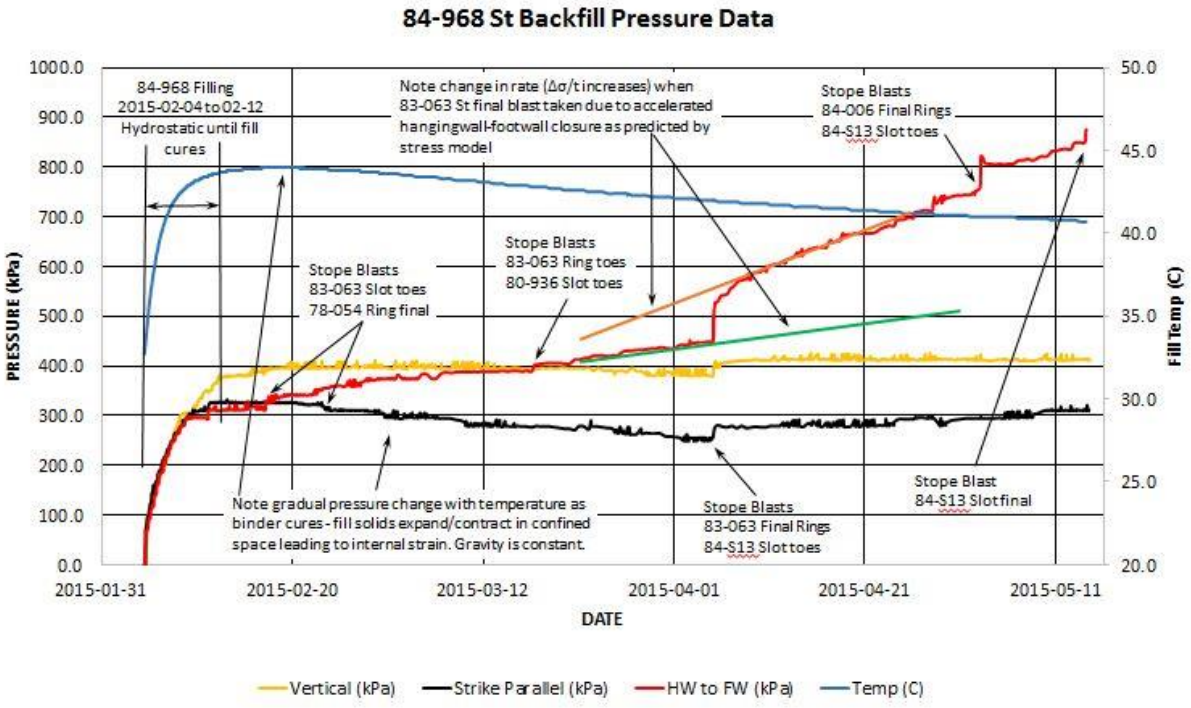


Figure 2-32: Évolution des pressions en fonction du temps à la mine Kidd (Counter, 2015).

2.6 Retour sur la compilation des études de cas

La variabilité importante des propriétés géomécaniques des remblais de chacune des opérations, des dimensions de chantiers et de galeries, des propriétés du massif rocheux et des types de barricades justifie le besoin d'instrumentation *in situ* pour toutes les opérations minières. Cette instrumentation permet de valider le temps de cure du remblai, les pressions qui se développent dans les chantiers et surtout du transfert de ces pressions vers les barricades.

Cette variabilité des propriétés implique des différences au niveau des valeurs de pressions mesurées, et ce, même à l'intérieur d'une même opération (mine Çayeli) où deux chantiers et deux barricades ont été instrumentés, mais avec des résultats complètement différents (Grabinsky et al.,

2011; Thompson et al., 2009, 2011, 2012, 2013). Une meilleure compréhension a permis pour de nombreuses opérations d'optimiser leur cycle de remblayage, d'augmenter la confiance de leur design et de sauver d'importants coûts de production. Thompson et al. (2011) estiment que les pressions moyennes sur une barricade tournent entre 100 et 200 kPa et la présente revue de littérature semble arriver aux mêmes conclusions. Par contre, comme un seul cas de test de rupture (Hughes et al., 2010) a été rapporté pour les barricades de béton projeté et que les designs de barricades changent d'une mine à l'autre et parfois même d'un chantier à l'autre, un besoin criant d'une plus grande compréhension des barricades est nécessaire.

Il a été souligné plusieurs fois que le moment critique pour une barricade de retenue du remblai est le moment entre le prérinçage des tuyaux de remblai hydraulique ou en pâte, qui définit le début d'une coulée, et le moment où le remblai devient autoportant. C'est à ce moment où les pressions sont maximales. Le remblai est en ce moment considéré comme un fluide à haute densité visqueux (fluide généralement non-Newtonien). Limiter ce temps critique est aussi une manière de limiter l'accumulation de pressions sur une barricade et de potentiellement permettre les coulées en continu. Certaines études tentent ainsi d'optimiser le drainage et la consolidation pour diminuer ce temps critique et permettre les coulés en continu comme par exemple les travaux de Yang et Li (2015) et Li (2013a) qui proposent de placer des drains de type *Wick*.

D'autre part, la revue de littérature n'a pas permis de trouver une seule référence qui décrit : la construction, les propriétés et les résistances d'une barricade de stériles, même si son utilisation est répandue dans les mines québécoises et canadiennes. Le Tableau 2-3 permet d'apprécier les différents résultats compilés. La compilation montre que dans le cas des chantiers dont tous les paramètres sont connus, les pressions maximales sont verticales et d'environ 400 kPa, mesurées sur le plancher des chantiers. Au niveau des barricades, encore une fois en négligeant certaines études dont les paramètres ne sont pas tous connus, ce mémoire présente des pressions maximales horizontales d'environ 240 kPa. Il est important toutefois de mentionner que ce ne sont pas toutes les études qui corrigent les pressions en fonction des variations de température, ce ne sont pas non plus toujours les mêmes capteurs qui sont utilisés. Pour chacun des 23 chantiers instrumentés, les fréquences et les périodes d'acquisition sont différentes ce qui rend les comparaisons difficiles. De plus, l'emplacement de la barricade et l'installation des équipements de mesure sont variables. Le taux de remblayage, le pourcentage de liant et le type de liants ont aussi des effets sur les pressions

mesurées, mais ces informations ne sont pas toujours présentes dans les références et donc non compilées dans ce travail. Il faut considérer aussi la dimension des chantiers et leur verticalité qui ont un impact également sur la formation d'effet d'arche ou pas, ce qui peut permettre de diminuer les pressions verticales et celles transférées aux barricades. Le Tableau 2-3 permet d'apprécier à quel point les dimensions des chantiers sont variables d'une opération à l'autre, passant d'un volume d'environ 1 000 m^3 à 36 000 m^3.

Tableau 2-3: Résumé des principaux résultats de mesures des pressions in situ dans des chantiers remblayés (chantiers et barricades)

Mine (# chantier)	Type Remblai	Hauteur * Largeur * Longueur (m)	Volume (m^3)	Profondeur cage	Pression maximale chantier	Pression hori. max barricade	Références
Fox	RH	180 X 10 X 10	18 000	ND	ND	100 kPa	Mitchell et al. 1975
Chimo	RPC	70 X 4 X 90	25 200	20 m	Longit. = 245 kPa	ND	Hassani et al. 2001
Bouchard-Hébert (10-30)	RPC	60 X 20 X 30	36 000	Plancher	Verti. = 403 kPa	ND	Zhu, 2002
Doyon (8-1 FW)	RPC	29 X 11 X 21	6 699	Plancher	Longit. = 150 kPa	55 kPa	Belem 2004
Williams (Alimak)	RPC	150 X 5 X 30	22 500	Plancher	Verti. = 32 kPa	40 kPa	Grabinsky et Bawden, 2007
Williams (9500-L70-5)	RPC	50 X 20 7	7 000	Plancher	Verti. = 79 kPa	76 kPa	Grabinsky et Bawden, 2007
Nord Ontario (5007)	RH	32 X ND X ND	ND	ND	ND	209 kPa	Fortin, 2008
Çayeli (Test 1)	RPC	19.5 X 19.5 X 6.2	2 358	Plancher	ND	98 kPa	Yumlu 2008; Yumlu et Guresci, 2007
Çayeli (Test 2)	RPC	17 X 13.6 X 8	1 850	Plancher	Verti. = 90 kPa	50 kPa	Yumlu 2008; Yumlu et Guresci, 2007
Çayeli (Test 3)	RPC	20 X 14.9 X 7	2 086	Plancher	Verti. et hori. = 90 kPa	72 kPa	Yumlu 2008 ; Yumlu et Guresci, 2007
Target (278 WOS 1S)	RPC	35 X ND X ND	ND	Plancher	ND	240 kPa	Ras et al. 2007
Çayeli (685-N20)	RPC	16.5 X 25 X 10	4 125	Milieu	Verti. = 184 kPa	45 kPa	Thompson et al. 2012
Çayeli (715-N22)	RPC	15 X 15 X 8.5	1 913	Milieu	Verti. = 223 kPa	100 kPa	Thompson et al. 2012
Kidd (67-SL1)	RPC	32 X 19 X 28	17 024	Plancher	Verti. = 575 kPa	65 kPa	Thompson et al. 2009
Kanowna Bell	RPC	40 X 15 X 18	10 800	Milieu	Verti. = 190 kPa	ND	Helinski et al. 2010
Savannah Nickel	RPC	23 X 10 X 12	2 760	Milieu	P. Pores = 24 kPa	ND	Helinski et al. 2010
Red Lake (34-806-1)	RPC	ND	ND	ND	ND	40 kPa	Hughes et al., 2010
Red Lake (test rupture)	RPC	ND	ND	ND	ND	127 kPa	Hughes et al., 2010
Coleman	RH	30 X ND X ND	ND	Plancher	Verti. = 287 kPa	145 kPa	Thompson et al. 2013
Garson Ramp	RPC	32 X ND X ND	ND	Plancher	Verti. = 375 kPa	ND	Thompson et al. 2013
Goldex	RPC	50 X 18 X 30	27 000	ND	ND = 600 kPa	ND	Doucet, 2014
Raleigh	RPC	17 X 3.5 X 18	1 071	Plancher	P. Pores = 140 kPa	30 kPa	Alsidqi et al. 2014
Lafranchi	RPC	41 X 15 X 20	12 300	Milieu	P. Pores = 35 kPa	40 kPa	Alsidqi et al. 2014
Kidd (84-968)	RPC	ND	ND	Plancher	Verti. = 400 kPa	ND	Counter, 2015

2.7 Prédiction des pressions sur une barricade de chantiers long trous remblayés grâce aux modèles physiques

Mitchell et Roettger (1984) indiquent que si l'on se fie uniquement à la formule qui calcule les pressions en multipliant le poids volumique d'un remblai par la hauteur d'un chantier, les ouvrages nécessaires pour retenir ces pressions seront nettement surdimensionnées. Ces ouvrages, comme les cloisons bétonnées ou les bouchons en béton, sont nécessaires pour des besoins permanents et non pas comme des ouvrages temporaires que doivent être les barricades minières pour retenir du remblai hydraulique ou en pâte. Smith et Mitchell (1982) proposent la formule [2-1] pour calculer la contrainte horizontale sur la barricade pour le remblai hydraulique :

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = 0.4 * H * \gamma \left(1 - 0.6 * \frac{s}{d}\right) + \frac{s * \gamma_w}{R\left(1 + \frac{s}{H}\right)} \quad où\, R = \frac{P * A}{P_1 * A_1} \qquad [2\text{-}1]$$

$s =$ Distance à laquelle la barricade a été construite (m)
$d =$ Hauteur de la galerie (m)
$P =$ Taux de percolation du remblai dans la galerie (m / s^2)
$P_1 =$ Taux de percolation du remblai dans la masse (m / s^2)
$A =$ Aire de la section de la galerie (m^2)
$A_1 =$ Aire de la section du chantier (m^2)
$H =$ Hauteur du chantier (m)
$a =$ Aire de la surface drainante de la barricade (m^2)

Suite au test réalisé grâce à un modèle physique, Mitchell et Roettger (1984) ont reproduit un chantier long trou qui leur a permis de modifier l'équation [2-1] pour en proposer l'équation [2-2].

$$\sigma_h = \gamma * H \left[\frac{A * \gamma_w}{\gamma * R\left(1 + \frac{H}{a}\right)}\right]\left(1 - 0.6 * \frac{s}{d}\right) \qquad [2\text{-}2]$$

Cette nouvelle équation tient compte de l'effet d'arche dans la galerie de soutirage et tient toujours compte des perméabilités différentes du remblai dans la galerie de soutirage et dans la

colonne de remblai. La Figure 2-33 montre les pressions obtenues dans le modèle physique et les pressions mesurées.

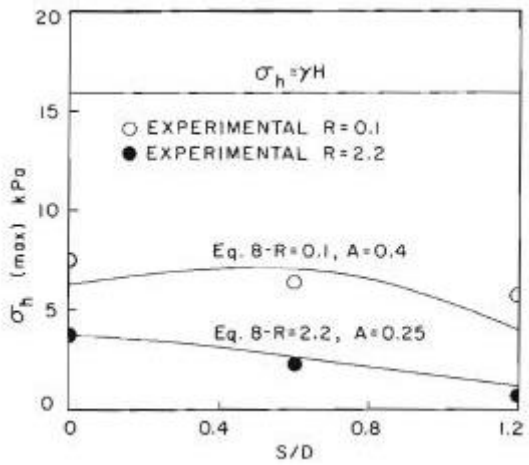


Figure 2-33: Pressions mesurées à la base du modèle physique et comparé avec la formule [2-2] et la formule du poids des terres (Mitchell et Roettger, 1984).

Le modèle physique avait une hauteur de colonne de remblai de 80 cm avec différents rapports de dimensions. Si on applique la formule [2-2] avec un chantier standard de remblai hydraulique drainé $\left(H = 50m;\ w = 15m;\ s = 0{,}6;\ R = 2{,}2;\ \gamma = 25\frac{kN}{m^3}\right)$ la pression horizontale prévue par la formule [2-2], obtenue grâce au modèle physique, est de seulement 180 kPa. Cette valeur représente environ 15% de la pression verticale prévue par le poids des terres (1250 kPa). Ce que la formule permet aussi de montrer, c'est que si les taux de percolation sont plus bas (mauvais drainage), les pressions à prévoir à la barricade peuvent rapidement monter jusqu'à atteindre la moitié de la pression prévue par la formule du poids des terres. L'emplacement de la barricade est aussi très important, puisque plus il s'éloigne de l'épaulement, plus les pressions prévues tendront à diminuer (Mitchell et Roettger, 1984).

Soderberg et Busch (1985) ont aussi réalisé des tests à l'aide d'un modèle physique pour simuler le remblayage de chantiers à l'aide de sable. Le modèle simule un chantier avec un tuyau de diamètre de 35 cm et d'une hauteur de 4,5 m de hauteur rempli avec du sable et une barricade dans une galerie cylindrique de diamètre de 5 cm et de longueur de 10 cm. Un piston à air était aussi ajouté au sommet de ce modèle pour transmettre des pressions à la colonne de sable. Pour simuler le drainage sous terre, le choix du matériau a permis d'obtenir un taux de percolation d'environ 10

cm/h, ce qui est représentatif des valeurs de drainage dans un chantier remblayé avec du sable. Si on se réfère à la Figure 2-34, il est possible de constater que les pressions maximales mesurées à la barricade dans ce modèle physique sont d'environ 2,8 psi (19,3 kPa).

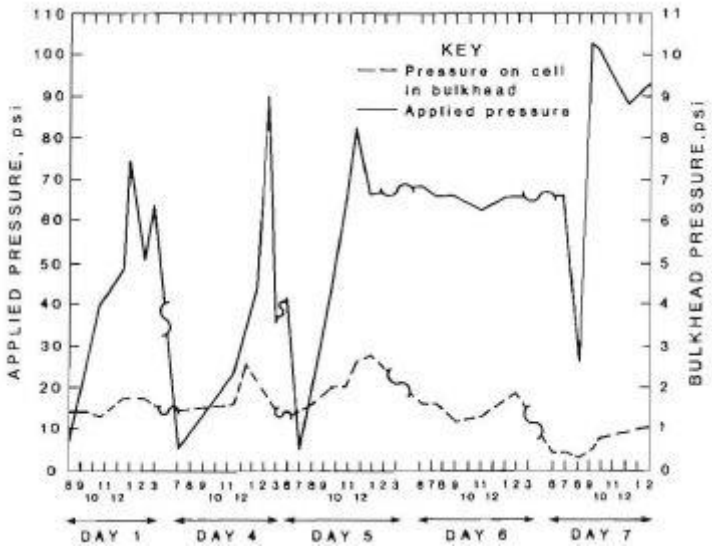


Figure 2-34: Pression mesurée à la barricade en fonction du temps et des pressions appliquées (Soderberg et Busch, 1985).

Bien que non visibles sur la Figure 2-34, les pressions maximales avant l'ouverture du drain, dès que la pression induite a atteint un maximum de 620 kPa (90 psi) étaient de 683 kPa (99 psi). Ces valeurs ont été obtenues dans les premières minutes de l'essai, avant l'ouverture du drain. Suite à cette étude, un type de barricade hybride a été proposé par les auteurs, soit une base de béton imperméable jusqu'à 2 pieds au-dessus du drain avec des boiseries placées horizontalement au-dessus supporté par d'autres boiseries verticales. La section en bois permet à l'eau excédentaire de se drainer, mais pas au sable de s'échapper.

2.8 Prédiction des pressions théoriques dans un chantier remblayé

La relation du transfert entre les pressions verticales (chantier) et les pressions horizontales (galerie de soutirage) est un mécanisme clé à comprendre pour prédire les pressions sur une barricade. La prédiction de la magnitude des pressions horizontales en fonction de la hauteur d'une colonne de RPC va permettre d'améliorer de manière importante les designs de barricades.

Janssen (Al-Hassan et al., 2012; Janssen, 1895; Sperl, 2006) a fait de nombreux essais pour déterminer les pressions verticales et horizontales dans un silo de maïs. Ces études ont montré que le poids excercé au bas du silo était plus faible que le poids réel du maïs. Janssen a donc émis l'hypothèse de la théorie des arches qui stipule que la friction entre le maïs et les parois du silo réduit les pressions verticales puisqu'une partie des pressions verticales est transmise aux murs. Étant donnée la nature granulaire du maïs, de nombreux parallèles peuvent être faient avec les sols granulaires et le remblai en pâte cimenté. La théorie des arches est résumée dans l'équation [2-3] Janssen (1895).

$$\sigma_h = \frac{\gamma B}{2tan\delta}\left(\left(1 - e^{-2k\frac{Z}{B}tan\delta}\right)\right) \qquad [2\text{-}3]$$

$\gamma =$ Poids volumique du sol (kN / m^3)
$B =$ Largeur du chantier(m)
$Z =$ Profondeur(m)
$H =$ Hauteur(m)
$\delta =$ Angle de friction interne entre le mais et les épontes$(°)$
$k =$ Coefficient de poussée latérale des terres
$\varphi' =$ Angle de friction interne dans le remblai$(°)$

Le coefficient de poussée latérale des terres est décrit par la théorie de Rankine, disponible dans plusieurs références de géotechnique y compris: Mbonimpa (2014):

$$P_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_a = \frac{1}{2}\gamma_t H^2 \cos i \frac{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}} \qquad [2\text{-}4]$$

P_a = Charge active résultante sur un mur vertical (kPa)
γ = Poids volumique du sol (kN/m^3)
H = Hauteur du sol (m)
K_a = Coefficient de poussée active des terres
ϕ = Angle de friction interne du sol ($^\circ$)
i = Angle des pressions par rapport à l'horizontale ($^\circ$)

La relation entre la théorie de Rankine et le remblai a été proposée par Mitchell et Roettger (1984), puis reprise par Revell et Sainsbury (2007b) et Dehn et al. (2007). La théorie de Rankine permet de faire la relation entre les pressions horizontales et les pressions verticales basée sur un coefficient qui est déterminé en sachant si le sol effectue une poussée active, passive ou s'il est au « repos ». Cette théorie a donc été adaptée pour le remblai, mais elle a été mise au point pour un sol homogène, bien drainé, sans cohésion et avec un coefficient de friction interne. Les pressions horizontales qui se développent dans le remblai poussent sur une barricade et donc, conformément à la théorie de Rankine, le remblai (considéré ici comme un sol) est en phase active. Mitchell et al. (1982) ont déterminé que la valeur de K_a est égale à 1, donc que les pressions horizontales et verticales sont équivalentes. Revell et Sainsbury (2007b) ont aussi estimé que K_a était égal à 1.

Marcinyshyn et al. (1997) ont montré que le remblai se comporte de manière passive ou au repos après la coulée et la consolidation et donc que le coefficient de poussée des terres est supérieur à 1. Il y a une complexité certaine dans la prédiction des pressions horizontales qui se développent en amont d'une barricade puisque le RPC ne peut pas être considéré comme de l'eau, ni vraiment comme un sol. Bien que les travaux ne fassent pas référence à une phase "hydrostatique", le choix de ce terme est inapproprié. Comme le montrent les mesures *in situ* dans des chantiers instrumentés, jamais les pressions dans les trois directions sont égales. Le RPC est donc un fluide complexe et les simplifications pour supposer qu'il se comporte comme de l'eau ou comme un sol ne sont pas vraiment applicables. En effet, au même moment où les pressions sont égales dans les trois directions dans le chantier, les pressions horizontales à la barricade ou dans la galerie de soutirage sont toujours nettement plus basses, donc le remblai ne peut être considéré comme de l'eau, même en début de remblayage.

Aubertin et al. (2005) présentent différentes solutions analytiques pour évaluer différentes pressions dans le remblai et aux épontes de chantier en fonction de différentes configurations

géométriques et de propriétés des matériaux. Si on considère le cas général, c'est-à-dire le chantier vertical avec des solutions analytiques 2D, les équations à utiliser pour calculer les contraintes verticales et horizontales sont dérivées de celles proposées par Marston (1930) et reformulées par Aubertin et al. (2005), voir formules [2-5] et [2-6]:

$$\sigma_{vz} = \frac{\gamma B}{2K\tan\phi'}\left[1-\exp\left(\frac{-2Kz\tan\phi'}{B}\right)\right] \qquad [2\text{-}5]$$

$$\sigma_{hz} = \frac{\gamma B}{2\tan\phi'}\left[1-\exp\left(\frac{-2Kz\tan\phi'}{B}\right)\right] \qquad [2\text{-}6]$$

$z =$ Profondeur du point de calcul dans le remblai (m)
$\gamma =$ Poids volumique total du remblai (kN/m^3)
σ_{hz} et $\sigma_{vz} =$ Contraintes verticales et horizontales
$\phi' =$ Angle de frottement interne dans le remblai ($^\circ$)
$B =$ Largeur du chantier remblayé (m)
$K =$ Coefficient de poussée des terres
$c =$ Cohésion du RPC

2.8.1 Effet d'arche

Les valeurs du coefficient de poussée des terres (K) varient, mais de manière générale restent dans l'intervalle de 0,3 à 3. La théorie de l'effet d'arche est attribuée à Janssen et quelques autres (McCarthy, 1977; Terzaghi, 1943) et elle permet d'expliquer l'écart entre les contraintes verticales calculée par le poids des terres et celles mesurée au bas d'un chantier. Les calculs montrent que la contrainte verticale au plancher du chantier peut varier jusqu'à 80% (Aubertin et al., 2003). La méthode développée par Marston (1930) est la première qui fait le lien entre la théorie de l'effet d'arche et le remblayage de type civil. Cet auteur a développé sa théorie pour estimer la contrainte sur des conduites enfouies, mais elle s'applique aussi pour calculer les contraintes horizontales et verticales sur les murs d'un chantier souterrain remblayé. Par contre, le modèle est en 2 dimensions et il ne tient pas compte de la cohésion et de la pression interstitielle et il est surtout applicable pour les chantiers simples et verticaux. Une autre limitation majeure, c'est le facteur temps qui n'est pas considéré.

2.8.2 Dissipation de la pression interstitielle

La réduction de la pression des pores dans le temps lors d'un remblayage est causé par l'hydratation du liant et par la consolidation gravitaire de la pâte (drainage). La majorité des modèles actuels de consolidation gravitaire tiennent compte des travaux de Gibson (1958). Le modèle unidimensionnel de consolidation a au départ été mis au point pour des argiles saturées. Le modèle a été adapté pour développer un modèle d'éléments finis nommé MinTaCo par Seneviratne et al. (1996). Il a été repris par Helinski et al. (2007) pour incorporer les effets de l'hydratation du ciment et adapter le modèle pour qu'il soit en 2 dimensions. Les observations *in situ* semblent montrer que les valeurs maximales de pressions interstitielles sont obtenues au centre de la colonne de remblai dans la portion inférieure et les valeurs minimales sont obtenues dans la galerie de soutirage, près de la barricade. Ces observations concordent avec les valeurs maximales et minimales de pression mesurées et peuvent être corrélées avec la facilité de drainage qui est nettement supérieure dans la galerie de soutirage plutôt que dans la colonne de remblai. Le drainage dans les galeries dépend donc de la fracturation du massif et de la perméabilité de la barricade en question. Ce phénomène jumelé avec l'effet d'arche serait la principale raison pour laquelle les valeurs mesurées à la barricade d'un chantier remblayé sont si faibles (Tableau 2-3). Les pressions interstitielles mesurées *in situ* sont supérieures lors du début du remblayage (phase "hydrostatique") et baissent lors du début de l'hydratation des liants et de la consolidation.

2.8.3 Résistance mécanique du RPC

Il a été observé que la résistance mécanique des remblais augmente du haut du chantier vers le bas et que la résistance des remblais en pâte cimentés mesurée sous terre est souvent supérieure de 2 à 6 fois comparée à celle obtenue à partir des éprouvettes de remblais labo préparées avec les mêmes recettes de mélanges (Belem et al., 2002; Cayouette, 2003). Pour expliquer ces phénomènes, les différents auteurs mentionnent les paramètres de malaxage tels que l'affaissement au cône, la teneur en eau et le tassement due à la consolidation gravitaire. La consolidation gravitaire est aussi un phénomène important lors de la cure, Cayouette (2003) a mesuré des tassements de 0,91 m à 1,5 m (maximum 4 m). La théorie de la consolidation gravitaire des matériaux fins montre que le tassement se fait en raison du drainage du remblai en pâte cimenté qui s'opère lors de l'évacuation de son eau interstitielle sous l'effet du poids propre du remblai (McCarthy, 1977). Cette opération de drainage et de tassement est favorable à la cure du remblai puisqu'elle permet au remblai de développer une meilleure résistance mécanique (Belem et al., 2000).

La résistance en compression uniaxiale (UCS) est le paramètre clé le plus utilisé pour les designs de remblai en pâte cimenté (Belem et Benzaazoua, 2008). Les valeurs cibles qui tentent d'être atteintes en terme de résistance sont de 0,25 à 4,35 MPa tout dépendant du type de design, du remblayage de chantiers primaires au support de toit d'un vide (Belem et al., 2009). Mais ce n'est pas seulement cette valeur d'UCS qui importe nécessairement. Dans le cas du remblai dont une face sera exposée, c'est surtout sa résistance au cisaillement qui devra être suffisante alors que dans le deuxième cas, c'est sa rigidité et sa cohésion mécanique qui va contrôler la rupture ou non. Sans surprise, la résistance du remblai augmente lorsque le pourcentage de liants, le pourcentage solide et le temps de cure sont augmentés. Grossièrement, une résistance de 1 MPa après 28 jours est l'objectif général d'une conception réussie de remblai en pâte cimenté (Yumlu, 2008).

2.9 Formules existantes pour le dimensionnement des bouchons en béton

Lang (1999) répertorie les équations qui avaient été initialement développées dans le cadre des travaux réalisés dans les mines souterraines en Afrique du Sud par Garrett et Campbell Pitt (1958, 1961) qui servent pour le dimensionnement des bouchons en béton. En supposant que le bouchon en béton de masse est parallèle au point de soutirage (forme parallélopipédique en 3D et rectangulaire en 2D), Garrett et Campbell Pitt (1961) proposent l'équation générale (FS = 1) suivante :

$$FS = \frac{\text{Force résistante}}{\text{Force de poussée}} = \frac{2(h+w)L \cdot U}{\rho \cdot g \cdot H \cdot w \cdot h} = 1 \qquad [2\text{-}7]$$

$$L = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot w \cdot h}{2(h+w) \cdot U} \qquad [2\text{-}8]$$

$h =$ hauteur de la galerie (m)
$w =$ largeur de la galerie (m)
$U =$ résistance cisaillement admissible de la roche encaissante (m) ou prendre f_s si $f_s < U$
$H =$ hauteur de la colonne d'eau (m)
$\rho =$ poids volumique du fluide (kN/m^3)
$g =$ constante gravitationnelle (9,81m/s^2)

Selon la norme ACI (1972), la résistance au cisaillement admissible du béton de masse f'_s doit être utilisée en lieu et place de celle de la roche (U) lorsque f'_s < U. L'expression de f'_s est donnée comme suit (ACI, 1972) :

$$f_s' = 2\sqrt{f_c'} \qquad [2\text{-}9]$$

f_s' = résistance au cisaillement adimissible du béton

f_c' = résistance en compression du béton

La formule [2-8] est utilisée pour dimensionner des bouchons étanches en béton, plus précisément des bouchons parallèles comme à la Figure 2-35.

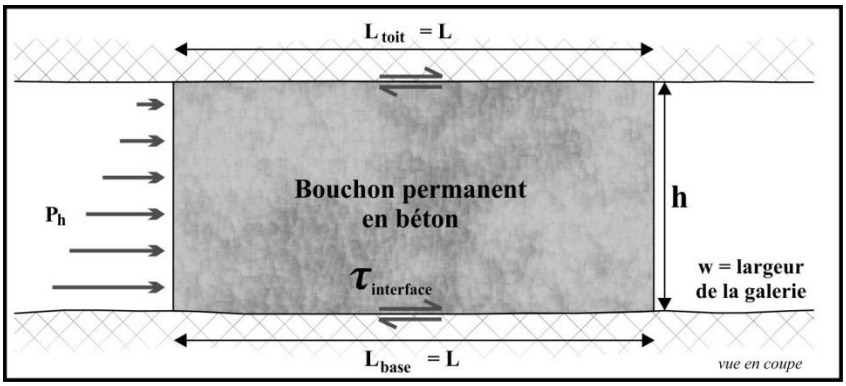


Figure 2-35: Schéma d'un bouchon permanent en béton de masse avec forces en jeu, adaptée de Garrett et Campbell Pitt (1958).

Kirkwood et Wu (1995) proposent une autre écriture de l'équation [2-8], où P = (ρ.g.H) et U ou f'_s = P_{pe}, tel que suivant:

$$L = \frac{P \cdot w \cdot h}{2(w+h) \cdot P_{pe}} \qquad [2\text{-}10]$$

L = Longueur du bouchon nécessaire

w = Largeur de la galerie

h = Hauteur de la galerie

P = Pression à contenir ($=\rho \cdot g \cdot H$)

P_{pe} = Résistance à la rupture par poinçonnement de la roche encaissante $= U$

Une autre écriture de l'équation [2-8] adoptée par Chekan (1985) du U.S. Bureau of Mines remplace h par b, w par a, (ρ.g.H) par P, et U par f'_s ou τ, comme suit :

$$L = \frac{P \cdot a \cdot b}{2(a+b) \cdot f_s} \qquad [2\text{-}11]$$

$L =$ longueur du bouchon (m)

$P =$ pression appliquée (kPa)

$a =$ largeur du bouchon (m)

$b =$ hauteur du bouchon (m)

$\tau = f_s =$ résistance au cisaillement admissible pour la roche ou le béton (kPa)

Garrett et Campbell Pitt (1961) préconisent que toutes opérations minières projetant de retenir d'importantes colonnes d'eau (plus de 1200 m) doivent préalablement être approuvées par un ingénieur minier du gouvernement. La théorie derrière les formules théoriques [2-8], [2-10] et [2-11] étant que la pression est transmise du bouchon à la roche et qu'une rupture anticipée par érosion de surverse est à prévoir autour de la périphérie du bouchon et sur toute sa longueur. Mais, Garrett et Campbell Pitt (1961) prévoient que la rupture risque de se produire directement à l'interface barricade-galerie plutôt que dans le bouchon, suite à des essais *in situ*. Considérant cela, les auteurs proposent de se pencher sur cette interface de la galerie qui n'est pas parfaitement plane, en raison des multiples angles de fracturation et des joints dans la roche. Ces surfaces non planes ont donc des angles entre 0° et 90° par rapport à l'angle de la pression, donc Garrett et Campbell Pitt (1961) considèrent un angle moyen de 45° pour un bouchon parallèle. Si le bouchon est en angle de 10° par exemple, les angles moyens deviennent de 55°. Dans ce cas-ci, comme la rupture se produit à l'interface, ce n'est plus la valeur de résistance au cisaillement dont il faut trouver la valeur, mais plutôt la valeur la plus basse entre la résistance en compression uniaxiale du béton et celle de la roche encaissante (f_c). En gardant la même nomenclature qu'avec l'équation [2-11] et en remplaçant f_s par f_c., car P.a.b = 2(a+b).(1/2).L.tan(45°).f_c, il en résulte l'expression suivante :

$$L = \frac{P \cdot a \cdot b}{(a+b) \cdot f_c} \qquad [2\text{-}12]$$

Garrett et Campbell Pitt (1961) mentionnent que toutes ces équations sont très simplifiées et qu'il est quasi-impossible de déterminer exactement le mécanisme de rupture (érosion de surverse, compression directe, rupture du bouchon, etc.) puisque la réalité se trouve probablement entre tous ces mécanismes. On peut supposer que le béton est homogène, mais il en est tout autrement pour le massif rocheux qui est extrêmement hétérogène en tenant compte des joints, des fractures et des fissures.

2.10 Formules existantes pour le dimensionnement des barricades de stériles

À la connaissance de l'auteur, seulement un faible nombre d'équipes de recherche s'intéressent spécifiquement au dimensionnement des barricades de stériles (ouvrages temporaires souterrains). Depuis 2009, les chercheurs de cette équipe ont publié quelques travaux sur le sujet (Aubertin et al., 2008; Li, 2013b; Li et Aubertin, 2009a, 2009b, 2011a, 2011b; Li et al., 2009; Yang et al., 2014; Yang et Li, 2015). La nécessité d'une étude approfondie des devis de barricades est motivée par les conséquences éventuellement désastreuses de rupture (de barricades de retenue pour le RPC ou RH) comme l'ennoiement de niveau, les dommages aux équipements, les pertes importantes de production et dans des cas extrêmes, des blessures ou la mort de personnel minier (Revell et Sainsbury, 2007b; Sivakugan et al., 2006; Soderberg et Busch, 1985).

2.10.1 Prédiction de la pression horizontale

Le design des barricades est basé sur les pressions maximales qui se développent au bas des chantiers remblayés dans les premiers instants suivant la fin du remblayage. C'est-à-dire avant le début de l'hydratation du remblai en pâte cimenté le transformant en matériau autoportant. Les pressions maximales sont mesurées lorsque la pression interstitielle est géostatique (i.e., égale au poids propre du remblai) aussi appelée "hydrostatique", sans contraintes effectives ou effet d'arche. C'est cette pression verticale (qui devient horizontale dans la galerie) qui peut déstabiliser la barricade. Hassani et Archibald (1998) définissent la pression horizontale appliquée sur une barricade comme la somme des contraintes horizontales et verticales moins la résistance due à la friction du remblai dans la galerie de soutirage (équations [2-13] et [2-14]).

$$P = \sigma_h + \sigma_v - F_r = U + P_a - F_r \qquad [2\text{-}13]$$

P = Pression maximale totale sur la barricades (kPa)
σ_h = Pression horizontale sur la barricades (kPa)
σ_v = Pression verticale due au remblai et à l'eau (kPa)
γ = Poids volumique (kN/m^3)
h = Hauteur du RPC (m)
F_r = Résistance due à la friction dans le matériel (0,1P à 0,4P)
U = Pression hydrostatique dans le RPC ($U = \gamma_W * h$)
P_a = Pression active horizontale sur la barricade (kPa)
ϕ = Angle de friction interne (°)

$$P_a = \gamma * h * \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \qquad [2\text{-}14]$$

Dans plusieurs modèles, la pression hydrostatique due à l'eau contenue dans le RPC est assumée égale à zéro puisque les barricades laissent drainer le RPC. Pourtant, les pressions contenues à la barricade sont maximales lorsque le RPC n'est pas encore drainé et c'est pourquoi le calcul de la pression hydrostatique est important. L'équation [2-15] de Mitchell et al. (1982) est prévue pour une barricade dont l'eau peut drainer jusqu'à obtenir un remblai hydraulique saturé à 50% et ayant un bon drainage.

$$P = \left(Q * I_d \frac{\gamma_w}{V_p} * A\right) + \left(\gamma_{hsf} * h * \tan^2\left(45 - \frac{\phi_s}{2}\right)\right) - F \qquad [2\text{-}15]$$

$$Q = \left(\frac{W_{ds}}{t}\right)\left[\left(\frac{1-\gamma_p}{\gamma_p}\right) - \left(\frac{n(1-S_w)}{\rho_s(1-n)}\right)\right] \qquad [2\text{-}16]$$

$Q =$ Quantité maximale d'eau de drainage (m^3)
$I_d =$ Longueur de la galerie de soutirage (m)
$\gamma_w =$ Poids volumique de l'eau $\left(kN/m^3\right)$
$V_p =$ Taux de percolation à travers la barricade $\left(m/h\right)$
$A =$ Aire de la galerie $\left(m^2\right)$
$W_{ds} =$ Poids des solides secs du RPC$\left(t/j\right)$
$t =$ taux d'efficacité placement de RPC $\left(h/j\right)$
$n =$ Porosité du RPC consolidé
$\rho_s =$ Masse volumique du RPC (kg/m^3)
$n =$ Porosité du RPC consolidé
$\gamma_{hsf} =$ Poids volumique pour RPC 50% saturé $\left(kN/m^3\right)$

La pression totale (P) exercée sur la barricade hydrostatique sera différente selon les situations, à savoir si le chantier est complètement ou partiellement saturé. Ces variations de degré de saturation font varier le poids volumique total. Le poids de la colonne de remblai en pâte cimenté pousse la barricade rocheuse sous forme de pression horizontale. Cette pression est transférée la barricade qui elle-même pousse sur les murs de la galerie qui retiennent le tout en place grâce à la résistance

au cisaillement de l'interface barricade et galerie. Les pressions horizontales sont aussi transférées du remblai vers les murs de la galerie en amont de la barricade de manière similaire à l'effet d'arche observée dans le chantier, mais à l'horizontale. Cet effet va faire ainsi diminuer la pression horizontale sur la barricade (Grabinsky et al., 2011; Sperl, 2006; Thompson et al., 2009). Smith et Mitchell (1982) proposent d'ailleurs de considérer la galerie de soutirage et la colonne du chantier de manière séparée pour tenir compte des différences au point de vue des propriétés géomécaniques entre le remblai dans le chantier et celui dans la galerie de soutirage.

2.10.2 Prédiction de la pression avec une solution analytique

Li et Aubertin (2009a) ont développé une solution analytique (équation [2-17]) pour calculer la pression (P) en condition totalement drainée (donc du remblai sec) appliquée sur une barricade dans des conditions drainées, c'est-à-dire sans pression interstitielles.

$$P = \frac{L_d H_d}{2}(\sigma_{hBO} + \sigma_{hTO}) \exp\left\{ -\frac{2\tan\delta_m}{K_{dl}} \left(\frac{1}{H_d} + \frac{K_{dt}}{L_d} \right) l \right\} \qquad [2\text{-}17]$$

Li et Aubertin (2009b) ont aussi développé une deuxième équation [2-18] pour évaluer la pression d'un remblai dans le cas d'un chantier remblayé saturé avec prise en compte de la pression hydrostatique :

$$P = \frac{L_d * H_d}{2} \left\{ (\sigma'_{hBO} + \sigma'_{hBTO}) \exp\left[-\frac{2\tan\delta_{sat}}{K'_{dl}} \left(\frac{1}{H_d} + \frac{K'_{dt}}{L_d} \right) l \right] + \gamma_w (2H_{sat} - H_{d)} \right\} \qquad [2\text{-}18]$$

Le symbole L_d représente la largeur de la galerie (*drift*) et H_d sa hauteur. σ'_{hBO} représente la contrainte effective horizontale au plancher de la galerie de soutirage, σ'_{hBTO} la contrainte effective au toit et δ_{sat} l'angle de friction à l'interface entre le RPC saturé et les murs. Le symbole K'_{dl} représente le coefficient de réaction effectif du RPC en condition drainée selon l'axe longitudinale et K'_{dt} le même coefficient, mais selon l'axe transversal. γ_w représente le poids volumique de l'eau. Li et Aubertin (2009a, 2009b) ont montré que $K_{dt} \approx K_a$ et $K_{dl} \approx K_p$. L'équation [2-12] est plus utile que l'équation [2-11] puisque les pressions maximales sont obtenues avec la formule [2-17] et ce sont les pressions les plus élevées anticipées qui vont dicter le dimensionnement des barricades. Les auteurs mentionnent donc que selon leur modèle, il est avantageux de reculer la barricade le plus loin dans la galerie de soutirage (particulièrement en conditions drainées). Les mesures *in situ* de

Thompson et al. (2009 et 2012) viennent appuyer cette hypothèse analytique tout comme Mitchell et Roettger (1984). Helinski et Grice (2007) ont montré que la perméabilité du RPC dans la galerie est d'un ordre de grandeur plus grand que celui dans le chantier, ce qui pourrait aussi expliquer les pressions plus faibles mesurées aux barricades comparées à celle mesurée dans les chantiers adjacents parce que le drainage et donc la dissipation de la pression interstitielle se fait plus rapidement. Helinski et Grice (2007) mentionnent que les macropores, le remplissage par superposition et le drainage importent plus pour expliquer cette perméabilité plus importante.

Ce qui vient donner de la résistance à l'ouvrage, ce sont les forces normales de compression au toit, au plancher et latéralement acquises par la procédure de construction des barricades par les chargeuses-navette et la *push-plate*. Mais les forces les plus importantes sont la résistance au cisaillement à l'interface barricade-remblai. D'ailleurs dans les modèles de Li et Aubertin (2009a, 2009b), la force normale au toit et la résistance au cisaillement sont négligées alors que pour celle des murs et du plancher, elle est calculée par le poids propre de la barricade. Les auteurs négligent aussi le possible effet d'arche dans la galerie horizontale mentionné par Sperl (2006). Pour estimer la résistance au cisaillement à l'interface, le critère de Mohr-Coulomb est utilisé. Les auteurs Li et Aubertin notent aussi qu'en raison des irrégularités géométriques importantes dans la galerie, le cisaillement se fait probablement plus entre les roches contenues dans la barricade que directement à l'interface tout comme Barton (2008). Li et al. (2009) proposent donc la formule suivante :

$$L_{barricade(bas)} = \frac{P}{(w + K_a h)\gamma_{roche} h * \tan\phi_{roche}} FS \qquad [2\text{-}19]$$

$$\text{où : } K_a = \frac{1 - \sin\phi_{roche}}{1 + \sin\phi_{roche}}$$

En appliquant l'équation [2-19], on peut obtenir différentes courbes présentées à la Figure 2-36 qui comparent le devis actuel de la mine LaRonde mis au point par essais et erreurs au fil des années et le modèle analytique de (Li et al., 2009). On voit que le modèle de Li et Aubertin (2009a) surévalue de manière importante la longueur des barricades de stériles nécessaires puisque les résultats obtenus, peu importe le facteur de sécurité, dépassent largement le 3,5 m recommandé dans les devis de la mine LaRonde. Deux valeurs importantes sont estimées et nécessitent davantage d'investigation. Il s'agit de l'angle de friction à l'interface de la roche encaissante et de la résistance au cisaillement de la barricade. Le modèle échoue à reproduire la réalité puisque la

courbe du design réel de LaRonde est sous la courbe avec un facteur de sécurité de 1. Cette courbe qui doit correspondre au maximum que peut supporter une barricade avant la rupture.

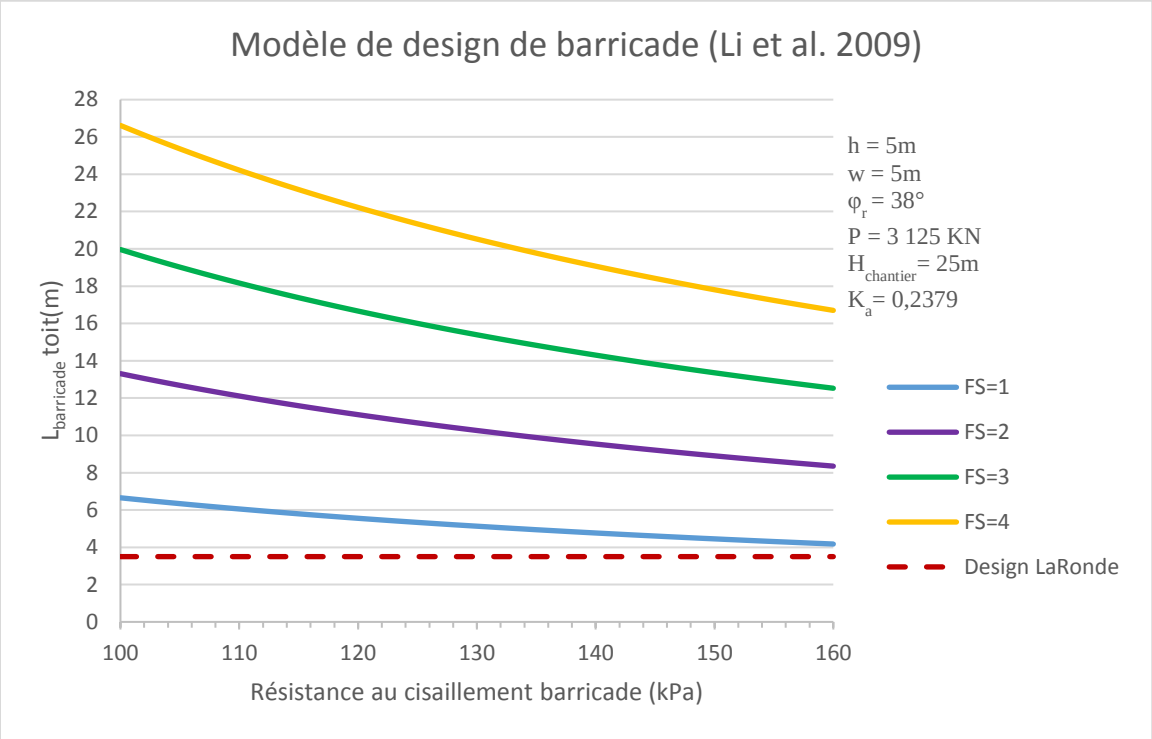


Figure 2-36: Modèle de design de barricades de stériles proposé par Li et al. (2009) avec différents facteurs de sécurité en comparaison avec les devis de mine LaRonde.

Le modèle de Li et al. (2009) tient compte d'une barricade ayant une forme rectangulaire alors que les barricades construites à l'aide de *push-plate* sont de forme trapézoïdale (voir la Figure 1-2). Li et Aubertin (2011a) supposent aussi que les barricades de stériles sont de formes rectangulaires. Les résultats démontrent que les dimensions prévues par le modèle peuvent devenir excessives dans le cas où la pression de l'eau interstitielle dans le remblai est élevée. Ils reprennent l'équation [2-18], mais l'adaptent pour tenir compte du fait que le remblai se draine rapidement et ne reste pas longtemps saturée.

2.10.3 physiqueAmélioration de la solution analytique de Li et Aubertin (2011)

Yang et al. (2014) proposent ainsi un nouveau modèle pour tenir compte de la géométrie des barricades de stériles. Ils séparent la barricade en une section centrale rectangulaire avec deux triangles extérieurs côté amont et aval pour mieux représenter la réalité. Pour élaborer ce modèle, les auteurs posent certaines hypothèses, ils négligent notamment les impacts du *flush*, i.e. la

quantité d'eau (en général 5 000 litres) déversée avant le début d'une coulée de RPC qui peut déstabiliser l'ouvrage. Par contre, les observations sous terre permettent d'affirmer qu'une quantité non négligeable de cette eau se draine à travers la barricade avant le début d'une coulée de RPC malgré le béton projeté qui couvre la majorité de la partie aval de la barricade. Il est ainsi possible d'affirmer qu'il y a risque d'érosion régressive (effet renard) à travers l'ouvrage ou à tout le moins que l'ouvrage devient totalement ou en partie saturé. D'ailleurs, dans l'article de compilation sur les procédures privilégiées par l'industrie minière, De Souza et al. (2003) rapportent que toutes les mines canadiennes questionnées appliquent le *flush* avant et après remblayage. De surcroit, comme la conductivité hydraulique du RPC est nettement plus basse que celle de la barricade, les auteurs négligent l'effet de l'eau dans la barricade. Il est donc assumé que l'eau contenue dans le *flush* (5 000 litres) ne s'accumulera pas dans l'ouvrage et qu'il demeurera drainé. La deuxième hypothèse posée par Yang et al. (2014), c'est que la force normale entre la barricade et le toit de la galerie de soutirage est nulle en raison des nombreux vides qui ont tendance à être présents. Par contre, c'est de négliger qu'en très large majorité, le côté aval de la barricade est renforcé avec du béton projeté. Celui-ci a justement pour mandat de remplir les vides et agir comme support pour augmenter significativement la résistance au cisaillement de l'interface barricade/toit. Néanmoins, la présence de support de terrain (boulons et grillage) qui dépasse des murs et du toit ainsi que les joints formés (entre 0 et 90°) lors du sautage de la galerie laisse présumer que l'utilisation d'angles de frictions spécifiques serait plus appropriée. Le modèle tient aussi compte du fait que l'angle de l'empilement en aval est généralement plus prononcé que l'angle en amont, qui lui correspond à l'angle de repos des stériles. L'angle en aval est influencé par la compaction mécanique et le béton projeté généralement apposé sur ce côté de la barricade. Il est vrai que dès la fin de la construction, l'angle aval est plus prononcé que celui en amont. Mais la période de temps qui s'écoule entre la fin de la compaction et le début de la projection de béton permet généralement aux stériles de la pente aval de retrouver un angle de repos très près de l'angle de repos sans compaction. Le modèle néglige aussi l'effet d'arche qui se produit directement dans la galerie comme mentionnée par Sperl (2006). De plus, les pressions horizontales exercées par la barricade sur les murs proviennent uniquement du poids propre de la barricade sans compter l'effet des pressions exercées par le remblai qui pousse sur l'ouvrage si on transpose les forces horizontales en forces verticales.

Néanmoins, l'analyse des résultats obtenus par ce nouveau modèle de Yang et al. (2014) montre que plus l'angle alpha 1 ou alpha 2 augmente, plus on se rapproche de l'ancienne solution de Li et

Aubertin (2011a) puisque la géométrie de la barricade se rapproche d'un rectangle. Si la comparaison est faite entre les deux modèles, en prenant des valeurs caractéristiques, la nouvelle solution nécessite l'utilisation de 54% moins de stériles. Le nouveau modèle se rapproche un peu plus des réalités de terrain. La réduction du volume est surtout attribuable à l'ajout dans Yang et al. (2014) de la pression du RPC qui pousse le côté amont de la barricade vers le plancher ce qui ajoute des forces normales et plus de résistance au cisaillement de l'ouvrage. Le Tableau 2-4 compare la longueur au toit de barricades proposées en fonction des deux modèles par rapport aux devis de LaRonde.

Tableau 2-4: Paramètres utilisés pour la comparaison entre Li et Aubertin (2011a) et Yang et al. (2014).

Variables	**Modèle (Li et al. 2011a)**	**Modèle (Yang et al. 2014)**
$H_{barricade}$	5 m	5 m
$L_{galerie}$	5 m	5 m
$H_{chantier}$	Variable	Variable
$\gamma_{remblai}$	20 kN/m3	20 kN/m3
φ'	35°	35°
α_{amont}	37°	37°
α_{aval}	50°	50°
$K=K_a$	0,271	0,271
FS	2,0	2,0
L_B ($H_{chantier}$ =9 m)	14,61 m	NA
P ($H_{chantier}$ =9 m)	3250 kN	5400 kN
L_{BT} ($H_{chantier}$ =9 m)	9,74 m	2,79 m
L_{BB} ($H_{chantier}$ =9 m)	19,47 m	13,62 m
V ($H_{chantier}$ =9 m)	378,99 m^3	205,14 m^3

Si l'on se réfère à la formule [2-20], cette nouvelle proposition de formule présentée dans Yang et al. (2014) permet de croire que le problème de surdimensionnement qui était présent dans les propositions de Li et Aubertin (2011a) a été corrigé. Par contre, pour arriver à des résultats qui se rapprochent des devis actuels comme présentés dans Figure 2-37, les auteurs utilisent un facteur de sécurité égal à 2.

$$L_{Bt} = \frac{P\left(FS * sin\alpha_1 - cos\alpha_1 * tan\delta\right) - \gamma * H_d^2\left(\left(\frac{L_d}{2}\right) + \left(\frac{k * H_d}{3}\right)\right)\left(\frac{1}{tan\alpha_1} + \frac{1}{tan\alpha_2}\right)tan\delta}{\gamma * H_d\left(L_d + kH_d\right)tan\delta} \quad [2\text{-}20]$$

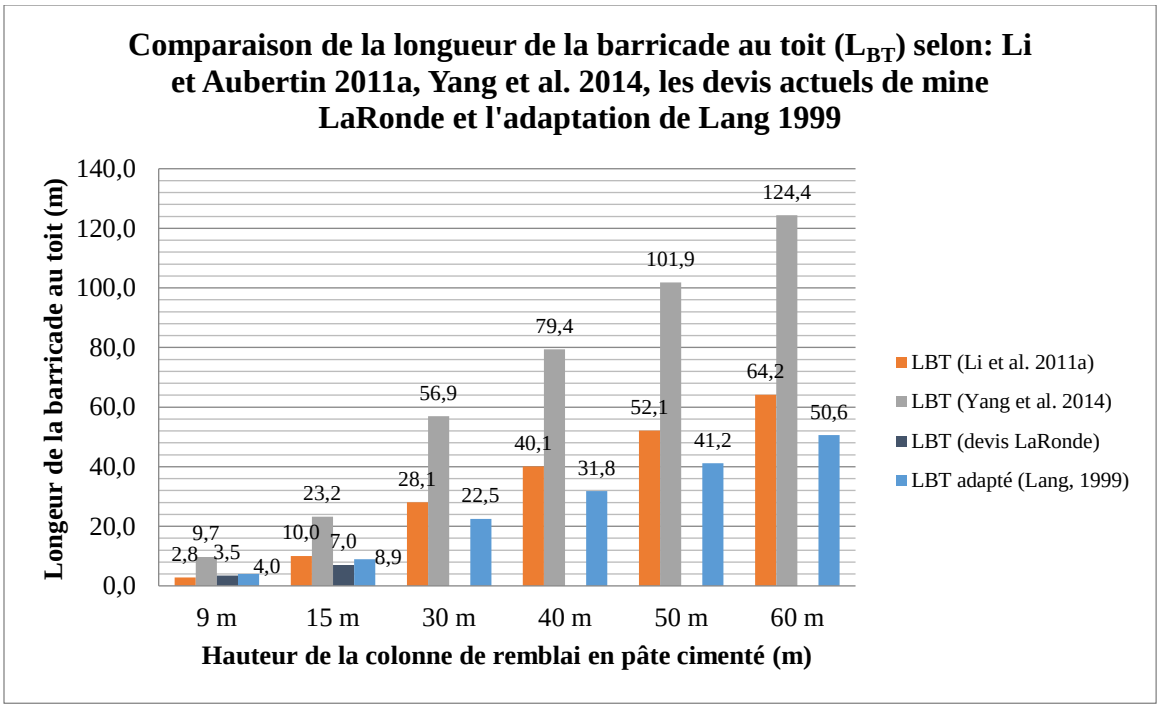


Figure 2-37: Comparaison entre la longueur de la barricade au toit en fonction de différentes hauteurs et les différentes formules présentées avec les devis actuels de LaRonde.

Si l'on décide d'utiliser un facteur de sécurité plus fréquemment utilisé dans l'industrie minière, soit de 1,5 et que les calculs sont refaits pour une hauteur de RPC de 9 m, on obtient une longueur de barricade négative (-0,862 m). Ce résultat laisse planer un sérieux doute sur le fait que ce modèle ne soit pas représentatif de la capacité de ces ouvrages. La suite de calcul présentée plus bas démontre ce constat.

$$P_{\text{bas de la barricade}} = h * \gamma = 4m * 20\tfrac{kN}{m^3} = 80kPa$$

$$P_{\text{haut de la barricade}} = h * \gamma = 9m * 20\tfrac{kN}{m^3} = 180kPa$$

$$P_{\text{moyenne}} = \frac{(P_{bas} + P_{haut})}{2} = \frac{(80kPa + 180kPa)}{2} = 130kPa$$

$$P = \frac{P_{\text{moyenne}} * H_d * L_d}{\sin\alpha_1} = \frac{130kPa * 5m * 5m}{\sin 37^\circ} = 5400kN$$

$$L_{Bt} = \frac{P\left(FS * sin\alpha_1 - cos\alpha_1 * tan\delta\right) - \gamma * H_d^2\left(\left(\frac{L_d}{2}\right) + \left(\frac{k * H_d}{3}\right)\right)\left(\frac{1}{tan\alpha_1} + \frac{1}{tan\alpha_2}\right)tan\delta}{\gamma * H_d\left(L_d + kH_d\right)tan\delta}$$

$$L_{Bt} = \frac{5400kN\left(1,5 * sin37° - cos37° * tan35°\right) - 20\frac{kN}{m^3} * 5m^2 * \left(\left(\frac{5m}{2}\right) + \left(\frac{0,271 * 5m}{3}\right)\right) * \left(\frac{1}{tan37°} + \frac{1}{tan50°}\right) * tan35°}{20\frac{kN}{m^3} * 5m\left(5m + 0,271 * 5m\right) * tan35°}$$

$$L_{Bt} = -0,862m$$

Une autre approche, c'est le concept de base pour le remblai hydraulique développé par Helinski et Grice (2007) qui supposent eux-aussi que les pressions maximales sont mesurées lorsque le niveau phréatique est le plus élevé, c'est-à-dire: égale à la hauteur de la colonne de remblai. Cette situation est observée en début de remblayage. Cette pression diminue progressivement à mesure que le couloir d'écoulement de l'eau atteint la barricade. Il est aussi assumée que la pression d'eau interstitielle diminue de manière linéaire dans le chantier et dans la galerie de soutirage. Comme l'aire du chantier est nettement supérieure à celle de la galerie de soutirage, le point où les pressions seront maximales se situe à l'intersection entre le chantier et la barricade, directement sous l'épaulement U_{DP} comme illustré à la Figure 2-38.

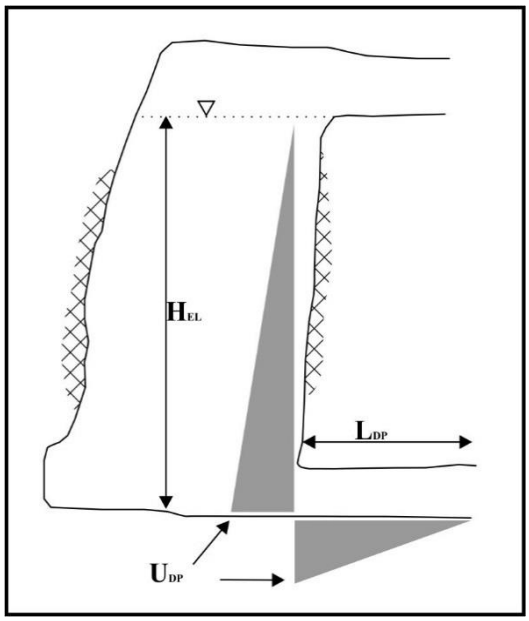


Figure 2-38: Schéma d'un chantier et du niveau phréatique (adaptée de Helinski et Grice, 2007).

D'ailleurs, l'expérience de nombreuses mines a amené l'élaboration de certains devis qui recommandent une construction à une certaine distance minimum de l'épaulement pour s'assurer que les pressions sur la barricade sont uniquement horizontales. Par exemple, les devis de la mine Target ne permettent pas la construction de barricades à moins de 5 m de l'épaulement (Ras et al., 2007).

Le taux de diminution d'énergie est inversement proportionnelle à la surface d'écoulement et proportionnelle à la conductivité hydraulique et donc la pression à l'intersection du chantier et de la galerie de soutirage comme montré dans l'équation [2-21] (Helinski et Grice, 2007).

$$U_{DP} = H * \gamma_w * \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{A_S * L_{DP} * K_v}{A_{DP} * L_S * K_h}} \right) \qquad [2\text{-}21]$$

U_{DP} = Pression interstitielle sous l'épaulement (kPa)

H = Hauteur de la nappe phréatique (m)

γ_w = Poids volumique de l'eau (kN/m^3)

A_S = Aire de la section du chantier (m^2)

A_{DP} = Aire de la section de la galerie de soutirage (m^2)

L_{DP} = Longueur de la galerie de soutirage (m)

L_S = Longueur du flux d'écoulement $\cong$ à la hauteur de la nappe (m)

K_V = Conductivité hydraulique verticale (m/s)

K_h = Conductivité hydraulique horizontale (m/s)

2.10.4 Remarques finales

L'analyse de stabilité du massif rocheux et des ouvrages souterrains doit se faire de concert avec les mesures et les observations *in situ*, les résultats en laboratoire, les modèles mathématiques (analytiques et/ou empiriques) et les simulations numériques. Pour pallier à certaines lacunes de connaissances dans le domaine du génie minier, la règle du pouce a dû être utilisée par de nombreuses opérations (Hughes, 2014). Un bon exemple de cet écart entre la recherche et le domaine pratique, c'est le fait que malgré une utilisation répandue du remblai en pâte cimenté, ce type de support secondaire demeure une technologie nouvelle. Conséquemment, plusieurs aspects fondamentaux concernant le remblai en pâte cimenté ne sont pas encore à ce jour très bien compris (Fall et al., 2007), y compris le dimensionnement des barricades de stériles.

Plusieurs méthodes de minage actuelles sont désormais intimement liées au remblai en pâte cimenté et dépendantes de leur compréhension. Un bon exemple en est l'abattage en calotte avec remblayage par chambres remblayées descendantes où l'on remplace de la roche de faible résistance, sous hautes contraintes et avec des problèmes de stabilité, par du remblai en pâte cimenté. Les besoins de miner des gisements particuliers et difficiles techniquement vont aller en augmentant comme les réserves minérales dans les gisements conventionnels diminuent rapidement et que les profondeurs d'extraction augmentent de manière significative.

Conformément à ce qui a été proposé pour la mine Olympic Dam en Australie en tenant compte des risques importants que peuvent entrainer une rupture de barricade, un facteur de sécurité acceptable est de 2,0 pour le remblai hydraulique et pour les bouchons étanches en béton de masse (Baldwin et Grice, 2000).

CHAPITRE 3 MÉTHOLOGIE ADOPTÉE

3.1 Description du site à l'étude, mine LaRonde

À la mine LaRonde, environ 25% des résidus ne sont pas envoyés au parc mais plutôt réutilisés pour la fabrication de remblai en pâte cimenté. Conformément au programme de contrôle de terrain d'Agnico Eagle division LaRonde, le but derrière l'utilisation du remblai en pâte cimenté est de fournir un confinement au massif rocheux suite à l'extraction d'un chantier. Ce confinement diminue le risque d'événements sismiques et diminue la convergence des murs.

3.1.1 Contexte géologique de la mine LaRonde

La mine souterraine LaRonde appartient aux mines Agnico Eagle Ltée. Elle est située à 45 km à l'Est de la ville de Rouyn-Noranda en Abitibi-Témiscamingue ou encore à environ 650 km au Nord-Ouest de Montréal. Entrée en production en 1988, le gisement de type sulfures massifs riches en or a produit surtout de l'or (Au) et de l'argent (Ag) avec des teneurs intéressantes en cuivre (Cu), zinc (Zn) et plomb (Pb). Le plan de minage à long terme de la mine LaRonde prévoit des opérations jusqu'en 2024. Le dépôt est l'un des plus importants au Canada avec des réserves de 8 millions d'onces d'or et 4,6 millions d'onces déjà produites depuis 1988 (statistiques tirées du site d'Agnico-Eagle (2014). La capacité journalière de l'usine de traitement est de 7 200 tonnes de minerai. Le traitement métallurgique est fait par flottation du cuivre et du zinc ainsi que la récupération et l'affinage de métaux précieux (Au, Ag) se fait directement sur le site minier. En 2014, le complexe minier LaRonde a produit 204 652 onces d'or, 1 275 000 onces d'argent, 10 515 tonnes de zinc et 4 997 tonnes de cuivre avec des coûts de production de 99 $ CA/tonne.

Le gisement est localisé au sein du camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde. Ce camp minier est près de la limite sud de la ceinture volcanique archéenne (2,7 Ga) à l'intérieur de la sous-province de l'Abitibi tout près de la sous-province du Pontiac qui font toutes deux parties de la province du supérieur du bouclier canadien. La limite de ces deux sous-provinces (Abitibi-Pontiac) est située à deux kilomètres au sud de LaRonde dont le contact est l'une des structures régionales les plus prolifiques en termes de gisement minier au monde, c'est-à-dire la faille Cadillac-Larder Lake. Cette faille s'étend sur 700 kilomètres à partir du nord-est de l'Ontario au nord-ouest du Québec.

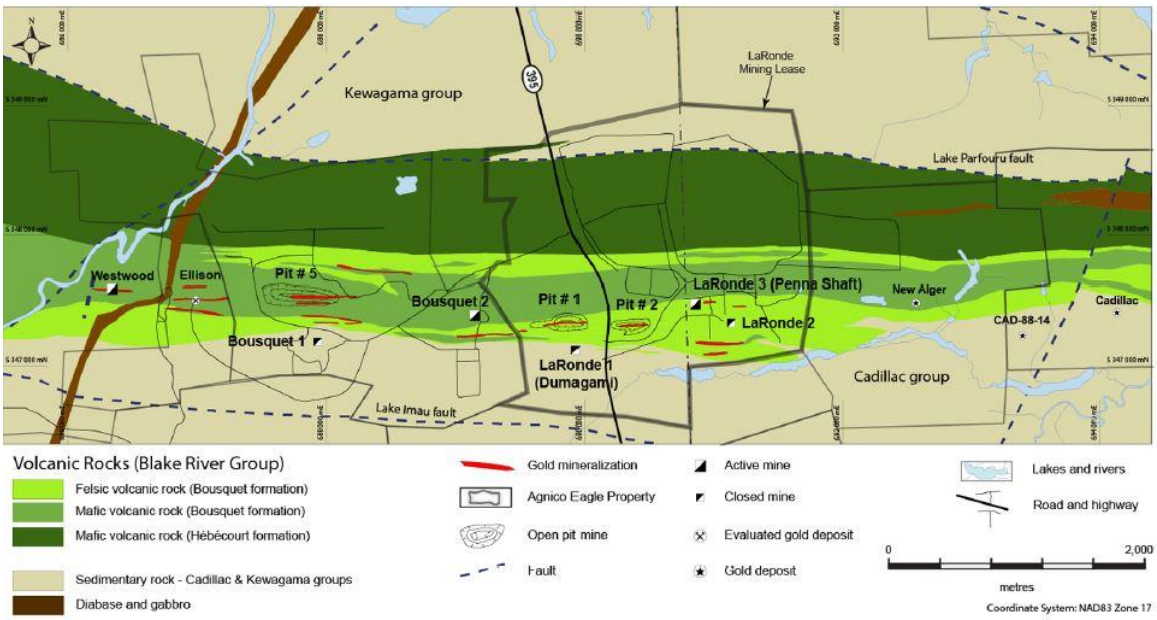


Figure 3-1: Géologie régionale de la mine LaRonde (Agnico-Eagle, 2014).

Comme le montre la Figure 3-1, la géologie qui circonscrit le gisement de LaRonde est constituée de trois unités régionales de direction Est-Ouest, au fort pendage vers le Sud. Ces unités sont celles du groupe de Kewagama (larges lits inter lités de wacke), groupe de Blake River (assemblage volcanique) et groupe de Cadillac (larges lits de wacke entrecoupés de schistes pelitiques et de formations de fer). Toute la minéralisation économique connue à LaRonde est comprise dans le groupe de Blake River. Les unités qui contiennent les valeurs économiques du gisement sont dans les limites de la formation Bousquet du groupe volcanique Blake River. La première lentille de sulfures massifs débute à 800 m sous la surface. La polarité stratigraphique est vers le Sud et les roches qu'on retrouve dans la mine LaRonde sont très déformées et altérées. La séquence volcanique évolue à la base d'une composition mafique (basaltique) vers des roches plus jeunes et felsiques (rhyodacites) sur le dessus. Les lentilles de sulfures sont insérées dans la séquence volcanique. Les lentilles ont des formes tabulaires, elles sont subverticales avec un fort pendage de 80 degrés vers le Sud avec une élongation vers le Sud-Ouest. L'épaisseur des lentilles varient entre 3 et 40 m. La minéralisation est principalement associée à la pyrite (Py), la chalcopyrite (CPy) et la sphalérite (Sph) qui se retrouvent dans un encaissant (gangue) constitué surtout de quartz (Qz) et de feldspath (Fd). Les réserves se distribuent dans 4 principales unités stratigraphiques numérotés du Nord vers le Sud en zones 7, 19, 20 et 21. Par contre, l'horizon qui demeure le plus favorable est la lentille 20 Nord qui représente 85% des réserves actuelles. Cette

lentille, tout comme le gisement, est polymétallique avec une forte zonation métallique, la partie supérieure étant riche en zinc, plomb et argent tandis que la partie inférieure est plus riche en or. Au courant de l'année 2015, mine LaRonde prévoit évaluer l'étendue de la minéralisation aurifère jusqu'à des profondeurs de 3 710 m. De nombreux défis émergent à mesure que la profondeur d'extraction augmente, notamment la convergence du massif rocheux, l'activité sismique et la chaleur ambiante.

3.1.2 Survol de la séquence de minage à la mine LaRonde

Les opérations souterraines actuelles à la mine LaRonde sont dépendantes de deux puits. Le premier, le puits Penna, descend jusqu'à une profondeur de 2 250 m et le deuxième, le puits no.4 qui permet d'atteindre le niveau 2 858 m. La Figure 3-2 présente une coupe longitudinale qui permet de mieux visualiser les dimensions et la localisation des différents ouvrages souterrains de la mine LaRonde.

La plupart des excavations permanentes ont été créées au Nord du gisement dans du basalte, roche plus compétente. Par contre, la majorité du développement pour accéder au minerai est fait dans un tuff felsique relativement compétent ($\sigma_{ci} = 120\ MPa$). Les structures régionales sont caractérisées par une foliation centimétrique à décimétrique à pendage de 75-80° vers le Sud, pseudo-parrallèle au gisement. Cette foliation rend le massif rocheux, encaissant aux excavations, très anisotrope et diminue la résistance du massif surtout lorsque jumelé à des bandes d'altérations de séricite. Comme les excavations de mine LaRonde sont faites sous hautes contraintes (plus de 105 MPa à 2 450 m), elles présentent différents degrés de flambage (Mercier-Langevin et Hadjigeorgiou, 2011; Mercier-Langevin et Turcotte, 2007). En général, les zones où de fortes déformations sont observées auront tendance à être moins sismiques que les zones plus compétentes avec une foliation moins prononcée et un degré d'altération plus faible (Mercier-Langevin et Hudyma, 2007). La plupart des chantiers de production sont minés par la méthode long trou transverse avec chantiers primaires et secondaires. Les chantiers ont en général des hauteurs de 30 m (plancher à plancher) avec des épaisseurs de minerai jusqu'à 40 m; ce qui justifie dans certains cas des chantiers A et B. C'est ce que montre la Figure 3-3 où le chantier A est pris en premier, puis remblayé et le deuxième chantier B est pris par la suite, donc du Sud vers le Nord.

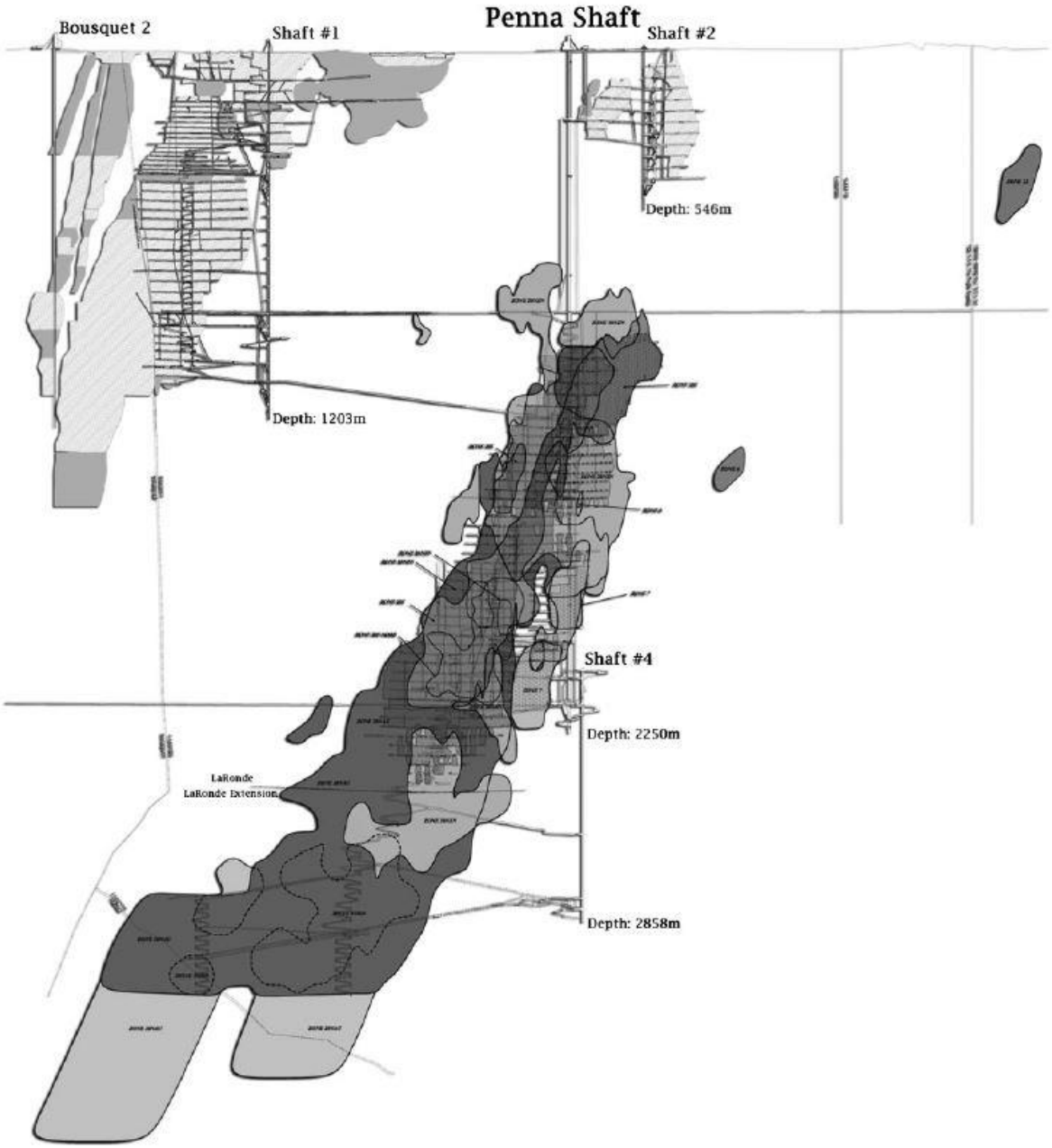


Figure 3-2: Longitudinale présentant le développement souterrain de la mine LaRonde (Mercier-Langevin, 2011).

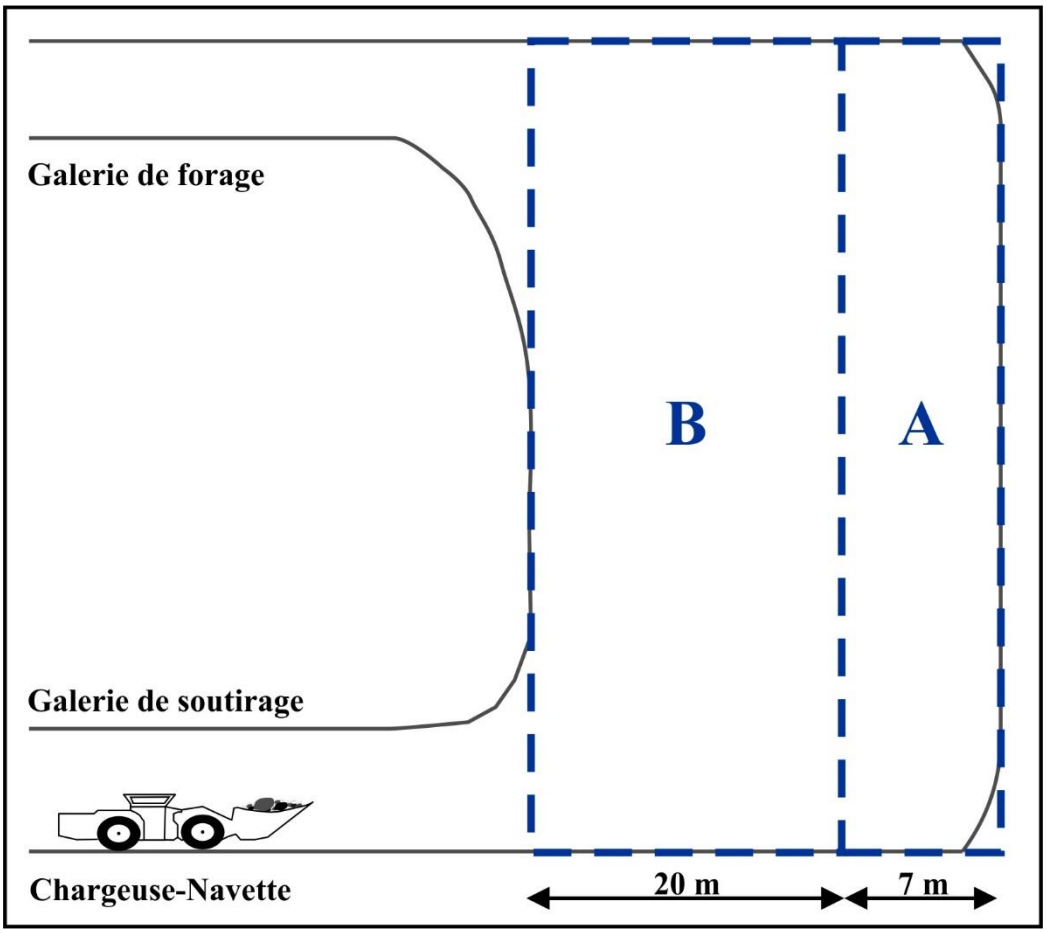


Figure 3-3: Croquis en coupe des chantiers A et B et de leurs dimensions moyennes à la mine LaRonde.

Les chantiers primaires ont des largeurs de 13,5 m et les chantiers secondaires de 16,5 m. Les chantiers primaires sont remblayés par du remblai en pâte cimenté ou du remblai rocheux cimenté ou un mélange des deux. Les chantiers secondaires sont remblayés avec du remblai rocheux sec ou mélangé avec du RPC pour pouvoir développer à travers. Les zones plus minces comme la zone 7 ou des parties de la zone 21 ou encore les extrémités de la lentille 20 sont minées par méthode de retrait longitudinale et remblayées par RPC ou remblai rocheux cimenté (Mercier-Langevin, 2011).

Pour bien contrôler la distribution des contraintes sous terre, chacun des développements et la prise de chantier sont planfiées de manière très rigoureuse. En général, le principe de la séquence en pyramide est suivi, une version simplifiée de ce principe est présenté à la Figure 3-4.

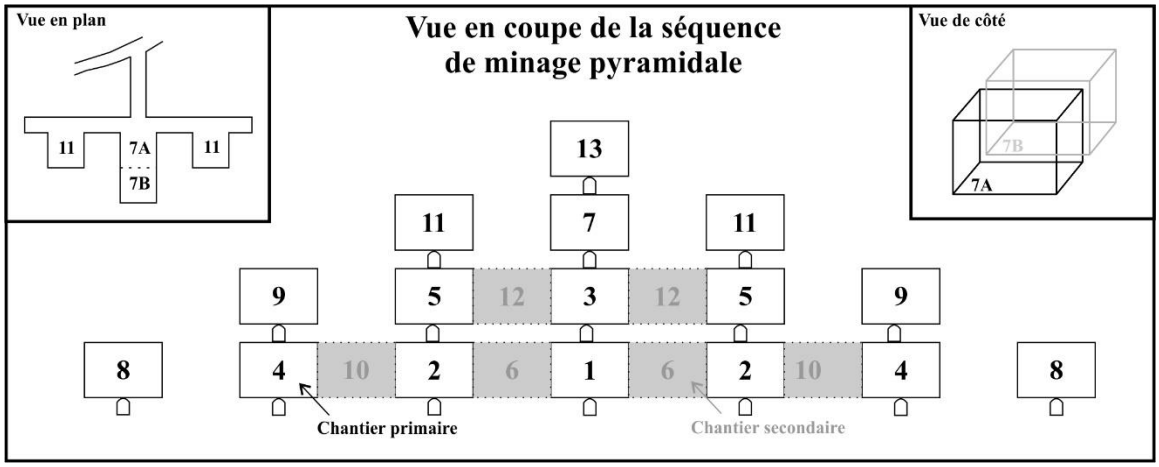


Figure 3-4: Croquis montrant une séquence de minage souterrain par pyramide, vue en coupe.

Pour atteindre les chantiers, le développement à travers les différentes unités lithologiques est fait par forage et sautage (Figure 3-5). Une fois que la ronde de 3 à 4 m est prise, dépendemment de l'endroit du développement, une attente conformément aux procédures sismiques est respectée avant que le personnel s'y approche. S'en suit le havage à l'aide de chargeuses-navette, puis le soutènement avec différents supports conformément aux devis d'ingénierie. L'arpentage permet ensuite de valider l'avancement, la géologie suit avec la cartographie et la prise d'échantillons si besoin, puis le département de mécanique des roches vient valider que tous les devis ont été suivis. Toutes ces étapes sont fait de concert avec les superviseurs de l'équipe de développement, production et construction du sous terre.

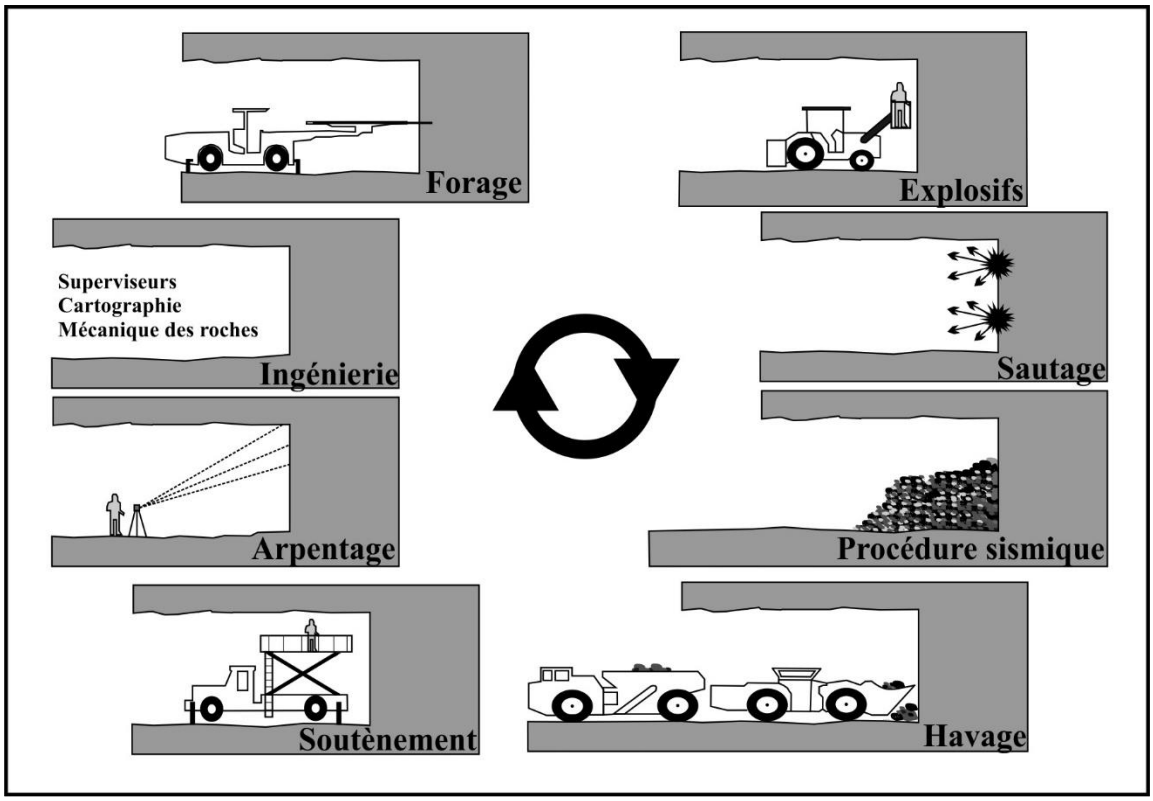


Figure 3-5: Croquis de la prise d'une volée de développement à la mine LaRonde.

Pendant que le développement se poursuit dans la galerie de forage (au-dessus du futur chantier) et dans la galerie de soutirage (sous le futur chantier), l'équipe de construction installe les tuyaux pour acheminer le remblai au toit de la galerie de forage. Un trou d'alésage est d'abord foré, puis les trous de production, s'ensuit le chargement et le sautage du chantier. Les chargeuses-navette vont ensuite vider le chantier par la galerie de soutirage, un godet à la fois. Une fois le chantier vidé, c'est la séquence de remblayage qui commence comme le montre la Figure 3-6:

a. Construction d'une barricade en deux temps (télécommandé, puis normal une fois l'interface barricade-toit comblé) dont le dimensionnement varie en fonction des besoins de résistance dans la galerie de soutirage ;
b. Mise en place de béton projeté dans la construction de la barricade ce qui implique une cure minimale de 12 heures avant de débuter le remblayage ;
c. Choix de la recette (% liant, type et tonnage) en fonction du type de chantier (primaire ou secondaire) et son positionnement dans la séquence de minage ;

d. Installation finale des tuyaux nécessaires à l'approvisionnement du remblai en pâte cimenté dans le chantier à remblayer ;
e. Test d'eau, environ 5 000 litres, pour s'assurer que le RPC coulera à la bonne place, et vérification de l'absence de fuites et lubrification de la ligne ;
f. Coulée d'un bouchon de RPC avec un pourcentage de liant plus élevé pour permettre le développement de meilleure résistance mécanique et ainsi permettre le développement par forage-sautage au travers. Un bouchon plus résistant à court terme permettra aussi de retenir les pressions engendrées par la coulée du remblai résiduel ;
g. Cure du bouchon sur une période minimale de 48 heures ;
h. Coulée du RPC résiduel avec des pourcentages de liant plus faibles puisque des résistances moins élevées sont nécessaires. En général, du stérile tout-venant est ajouté lors de la coulée du remblai en pâte cimenté dans la colonne résiduelle au rythme de 1 godet aux 5 à 8 minutes. Cela équivaut à environ 120 tonnes par heure pour un total d'environ 1 000 à 1 600 tonnes de stériles ajoutés à la colonne de remblai ;
i. La coulée est arrêtée à environ 8 pieds (2,4 m) du plancher de la galerie de forage pour la section inférieure de la mine (niveau 262 en descendant) et de deux pieds (0,6 m) pour la partie supérieure ;
j. Une fois le remblayage terminé, un lavage de la ligne est effectué, ce lavage correspond à environ 35 000 à 40 000 litres d'eau ;
k. La partie non remblayée par le RPC du chantier est comblée avec du stérile tout-venant, principalement pour permettre une meilleure traction lors du soutirage du chantier au-dessus.

En cas de fuite de pâte au niveau de la barricade, le remblayage est arrêté immédiatement. Si une coulée de bouchon est en cours, un lavage habituel (environ 30 000 litres d'eau) est effectué. Pour identifier des fuites de barricades, un capteur est installé entre le bassin de rétention et la PTF (*Plug Tight Fill*). Un détecteur est aussi placé depuis la galerie de forage par-dessus la colonne de remblai et permet de signifier à l'opérateur que le niveau de remblayage est atteint. Dans certain cas, une personne est désignée pour agir comme surveillant, par exemple lors du remblayage de cavités.

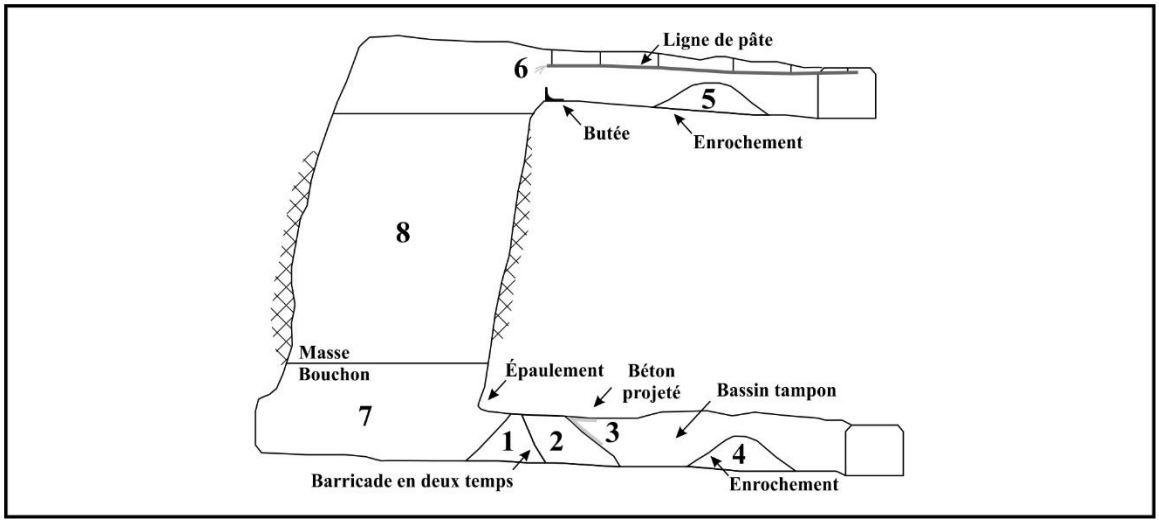


Figure 3-6: Croquis en coupe de la séquence de remblayage d'un chantier long trou à la mine LaRonde.

3.1.3 Fabrication du remblai en pâte cimenté

Aucun ajustement granulométrique n'est effectué sur les résidus, c'est-à-dire qu'il n'y a aucun hydrocyclonage avant de transformer les résidus en RPC. Par contre, avant d'être envoyés sous terre, les résidus doivent être sous la barre des 25 ppm de cyanure conformément aux normes environnementales et de santé-sécurité. Ce cyanure se mélange aux résidus lors du procédé de récupération de l'or effectué par cyanuration. Les cyanures sont détruits chimiquement par du SO_2 et de l'air dans une cuve d'agitation selon le procédé INCO. Cette méthode a pour effet d'augmenter significativement le pourcentage de sulfates dans l'eau interstitielle des résidus et rend le remblai en pâte cimenté de LaRonde sensible aux attaques sulfatiques. Le procédé permet de limiter la concentration de cyanure sous les normes environnementales soit moins de 25 ppm.

Une fois la décyanuration complétée, les résidus sont épaissis à environ 60% solide grâce à un épaississeur standard, l'utilisation de floculants et de chaux permettent une sédimentation plus rapide. Une fois ce pourcentage atteint, les résidus sont pompés dans un réservoir tampon d'environ 1 000 tonnes. Ce réservoir permet une autonomie de 4 à 5 heures avec un rythme de remblayage d'environ 200 tonnes à l'heure. Le réservoir d'entreposage a comme principale fonction d'entreposer la pulpe en provenance de la sous-verse de l'épaississeur de remblai et sert de tampon avant la préparation de la pâte. Le matériau est maintenu en suspension homogène à l'aide d'un mécanisme d'agitation.

Avant d'être envoyés sous terre, les résidus doivent être asséchés davantage pour augmenter leur pourcentage solide et tenter d'améliorer les compositions de l'eau interstitielle dans les résidus notamment en ce qui a trait à la teneur en sulfates. Le pourcentage de sulfates doit aussi être diminué au minimum puisque les sulfates sont des retardateurs de prise et à long terme des baisses de résistances peuvent être observées dans le RPC si des attaques sulfatiques se produisent. Ce dernier procédé de filtration est fait à l'aide de filtres à disques pour permettre d'atteindre un horizon entre 76% et 85% solide. La trémie tampon reçoit le matériau filtré provenant du filtre à disques; il servira de tampon permettant ainsi d'accumuler des résidus filtrés pour optimiser les cycles de malaxage. Les convoyeurs à vis multiples sont situés sous les trémies tampons des filtres à disques permettant ainsi une alimentation continue et uniforme au mélangeur haute intensité.

La dernière étape est le mélange des résidus avec les liants et l'eau de mélange qui est ajustée pour obtenir l'affaissement visé qui est entre 7 et 8 pouces (178 mm et 203 mm). Le mouvement en spirale à l'intérieur du mélangeur assure une très haute qualité de mélange de pâte. Pour avoir une chimie de l'eau de mélange optimale, de l'eau fraîche provenant du Lac Chassignol est utilisée plutôt que de l'eau souillée provenant du circuit d'eau recyclée. Deux silos à ciment de 200 tonnes (un contenant des scories et l'autre du ciment GU) munis de fluidiseur permettant un écoulement adéquat du matériau associé à chacun deux. Ces fluidiseurs opèrent selon une séquence automatique à intervalles régulier de 2 minutes pour une séquence lorsqu'aucun matériau ne sera soutiré de ce dernier.

Avant d'être envoyé sous terre, le pourcentage solide du remblai est ajusté à 72 % dans la trémie agitatrice. C'est la dernière étape du circuit de remblai en pâte avant la descente sous-terre. La trémie sert à emmagasiner, agiter et distribuer le remblai en pâte. Elle servira aussi à maintenir la charge nécessaire pour le bon écoulement de la pâte dans le circuit de tuyauterie souterrain. Il est très important de n'avoir aucune entrée d'air dans le réseau de distribution souterrain, c'est pourquoi un niveau (charge) minimale est maintenu pour ne pas avoir de succion. En effet, il faut éviter la succion pour ne pas rendre l'écoulement difficile et même bloquer le réseau. Les ingrédients (résidus filtrés, eau, liant) sont ajoutés dans un mélangeur à haute intensité en environ 72 secondes puis 30 secondes sont allouées pour le mélange.

Le Tableau 3-1 présente différentes caractéristiques des résidus de LaRonde (Benzaazoua et Belem, 2000; Deschamps, 2009). La réalité actuelle peut différer de celle présentée dans ce tableau

comme la métallurgie et les résidus de la mine LaRonde sont en constante évolution à mesure que le minage se poursuit en profondeur.

Tableau 3-1: Caractéristiques des résidus de la mine LaRonde (Deschamps, 2009)

Caractéristiques	**Unités**	**Valeurs**
Diamètre D_{10}	µm	5
Diamètre D_{50}	µm	34
Diamètre D_{60}	µm	48
Diamètre D_{90}	µm	156
$C_u = D_{60}/D_{10}$	-	9,6
$C_c = D^2_{30}/(D_{10}*D_{60})$	-	≈ 0,5
Densité relative	-	3,76
% de soufre	%	27,2
Potentiel d'acidité (PA)	kg $CaCO_3$/t	953
Potentiel de neutralisation (PN)	kg $CaCO_3$/t	0

Le débit d'une coulée de remblai en pâte peut être contrôlé par une plaque orifice. En début de procédure de remblayage, une période d'ajustement permet de déterminer le meilleur diamètre de l'orifice en fonction des conditions de pâte que l'on envoie. Le diamètre recherché est celui qui permet d'obtenir un écoulement constant en éliminant le temps d'attente dans le mélangeur et n'entraînant pas la fermeture de la valve de la trémie agitatrice (*Gob Hopper*). Il faut donc que la préparation de *batch* se fasse au même rythme que l'envoi du RPC sous terre. Des échantillons de pâte et parfois même des tests de rupture par cisaillement direct sont faits sur les échantillons curés dans des cylindres préparés à même le mélange. Avant le début du remblayage d'un chantier, un test d'eau est envoyé sous terre pour s'assurer que les transferts de tuyauterie ont été faits aux bons endroits et aussi pour lubrifier la ligne de remblai pour diminuer les pertes de charges. La Figure 3-7 résume de manière schématique la destruction des cyanures et la fabrication du remblai en pâte à la mine LaRonde.

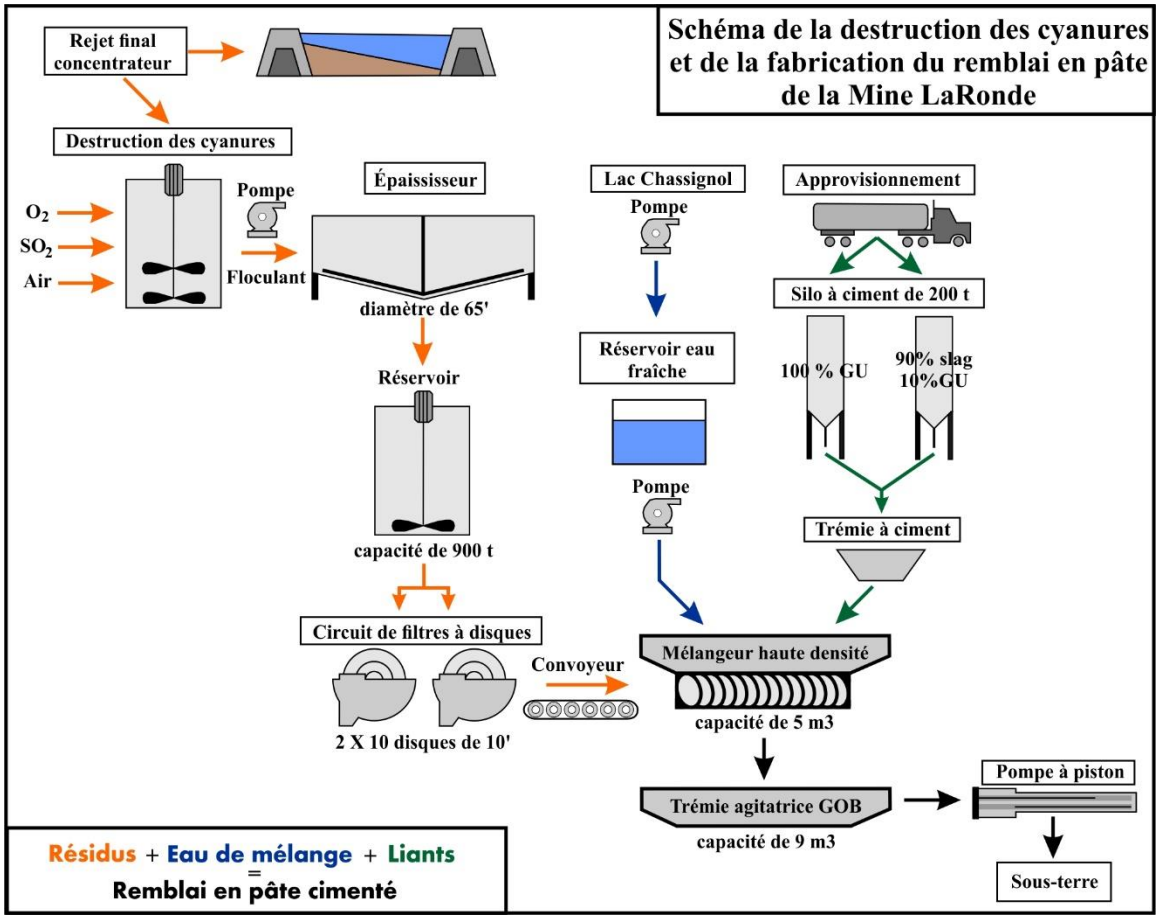


Figure 3-7: Schéma de la destruction des cyanures et de la fabrication du remblai en pâte à la mine LaRonde.

3.1.4 Recettes de remblai en pâte cimenté à la mine LaRonde

Plusieurs variantes de recettes de remblai en pâte cimenté sont couramment utilisées à la mine LaRonde, avec des pourcentages de liants variables qui contiennent des proportions de scories et de ciment type 10 (type GU) variables. L'affaissement visé est toujours entre 7 et 8 pouces (178-203 mm) et pour arriver à cet affaissement, une certaine quantité d'eau fraîche doit être ajoutée. Le mélange final, avant d'être envoyé sous terre, se fait par séquences (*batch*). Ces séquences sont contrôlées par la grosseur du mélangeur qui permet des mélanges d'environ 5,7 tonnes dans lesquels on retrouve environ 4,9 tonnes de résidus, 0,6 tonne d'eau fraîche et 0,2 tonne de liants. Ce mélangeur est à haute intensité, un temps de 72 secondes est nécessaire pour ajouter tous les constituants et ensuite 30 secondes sont attribuées pour le mélange. Pour l'affaissement, 2 tests au minimum sont effectués par poste de travail de 10 heures. Si l'affaissement est plus élevé que 8 pouces, de l'eau sera enlevée au mélange (réduction), mais l'opérateur surveille surtout les

pressions dans le système de distribution sous terre et dès qu'elles sont trop élevées, de l'eau est ajoutée pour garder ces valeurs en-dessous de valeurs jugées critiques. La capacité de production de RPC est d'environ 200 tonnes à l'heure.

3.1.5 Types de liants utilisés dans la fabrication du RPC à la mine LaRonde

Étant données les teneurs élevées en sulfates dans l'eau interstitielle des résidus, la mine LaRonde a toujours privilégié des liants non sensibles aux attaques sulfatiques. Historiquement, le ciment type 50 (type HS), résistant aux concentrations élevées en sulfates, a été privilégié. Comme ce produit est désormais discontinué et comme des dégradations de la résistance mécanique étaient observées, la mine LaRonde a dû s'adapter en modifiant ses choix de liants. C'est ainsi que l'utilisation de scories (ou *slag*) est apparue. Le principal avantage de la *slag*, c'est qu'elle permet des gains de résistance plus importants que le ciment type 10 (type GU) avec le temps. Son désavantage principal, c'est que sa vitesse de gain de résistance à court terme est plus basse que celle du ciment GU. Des tests ont été effectués et il a été démontré autant en laboratoire que sous terre que l'utilisation d'un mélange *slag*/ciment GU permettait d'obtenir de meilleures résistances avec le même temps de cure et moins de liants. Ceci permettait d'envisager une réduction de la quantité de liant nécessaire permettant du même coup une économie monétaire en diminuant le pourcentage de liant pour obtenir des résistances équivalentes.

L'utilisation de 100% de ciment GU est néanmoins demeurée pour les bouchons. En effet, le gain de résistance à court terme demeure supérieur pour une recette à 100% de ciment type GU. La hauteur du bouchon est en générale de 4 m au-dessus de l'épaulement. Dans le cas où un chantier sera sauté sous un bouchon, le mélange contenant de la *slag* (80% *slag* et 20% ciment GU) est privilégié pour donner de meilleures résistances et diminuer les risques d'effondrement. Ce même mélange est aussi privilégié dans toutes les colonnes résiduelles. Ce choix permet de diminuer les coûts dans les cas où peu de résistance est nécessaire.

Au niveau des produits utilisés, LaRonde a démontré que l'achat de ciment pré-mélangé (90% de *slag* et 10% de ciment GU) vendu par le fournisseur permettait d'avoir de meilleures résistances que si le mélange était fait sur place à la mine et par la mine. Le liant utilisé est le ciment pré-mélangé auquel on ajoute 10% du ciment Portland GU pour obtenir l'équivalent du liant optimal fait de 80% *slag* et 20% ciment Portland GU (anciennement désigné type 10). Le clinker et les laitiers de hauts fourneaux grossiers sont co-broyés ensemble pour obtenir le ciment composé de

90% *slag* et 10% ciment GU. Toutefois, aucune mention de cette hypothèse n'a été vérifiée à ma connaissance par un article scientifique. Ce commentaire a été fait par le personnel technique responsable du remblai à la mine LaRonde, le 24 mars 2015, lors d'une visite sous terre, au concentrateur et à l'usine de remblai. Cette visite était organisée dans le cadre du cours de l'IRME-UQAT sur les remblais miniers (GNM1002).

3.1.6 Système de distribution du RPC à la mine LaRonde

Le système de distribution se divise en deux circuits d'acheminement. Le réseau 1 qui longe le côté ouest de la zone 20 nord (zone 20) de la surface jusqu'au niveau 152 et le centre de celle-ci jusqu'au niveau 215. Le réseau 2 débute à la surface et se prolonge sur le niveau 86 vers l'est du gisement, il se divise par la suite en deux au niveau 86. Une portion longe la partie est de la zone 20 jusqu'au niveau 149 et passe par la suite à l'ouest de la zone 7 jusqu'au niveau 215. Le réseau 2, situé au sud, longe la zone 20 sud (zone 21) du niveau 86 au niveau 114. Cette configuration permet en tout temps l'usage de deux branches pour le remblayage à un même niveau.

L'enjeu d'optimisation est de diminuer l'affaissement pour obtenir une meilleure résistance tout en s'assurant de ne pas développer des pressions trop élevées dans le système de distribution. Ces pressions excessives peuvent causer des bris de tuyaux ou encore mener à des blocages. Ces deux phénomènes sont absolument à éviter pour limiter les pertes de temps et d'argent.

La mine LaRonde utilise la gravité et le pompage (à l'aide d'une pompe à déplacement positif) pour la distribution du remblai en pâte cimenté sous terre. Comme le remblai est distribué à de très grandes profondeurs, la pompe enregistre parfois des pressions négatives et donc elle retient le remblai plutôt que de le faire avancer.

Le débit de coulée du remblai en pâte cimenté est d'environ 200 à 240 tonnes par heure, avec une pointe record à 245 tonnes à l'heure. Ce débit est variable en fonction du liant utilisé. Il est aussi important de noter qu'un test d'eau d'environ 5 000 litres est fait dans le réseau de RPC avant de commencer la coulée dans le chantier. Le lavage à la fin d'une activité de remblayage à l'aide de remblai en pâte cimenté est d'environ 35 000 à 40 000 litres d'eau. Cette opération a pour but le nettoyage complet du système de distribution de la ligne de remblai en pâte cimenté.

Comme le mentionnent Paterson et al. (1998), la première cause de ruptures dans un réseau de distribution est la mauvaise installation plutôt que par de l'usure normale. La deuxième cause

majeure serait la corrosion externe des tuyaux, généralement causée par la combinaison de l'humidité et une ventilation inadéquate. Cette corrosion est responsable de 50 à 80% des ruptures de réseau. C'est pour cette raison que les inspections fréquentes d'un réseau de remblai sont très judicieuses pour un opérateur. C'est cette philosophie qui est privilégiée par l'équipe de remblai de la mine LaRonde. L'environnement acide associé à un gisement de type sulfure massif rend toutefois le contrôle de la corrosion ardu et c'est pourquoi des suivis de l'épaisseur des parois de tuyau sont réalisés couramment à l'aide d'instrumentations.

À la mine La Ronde, des tests d'affaissement sont uniquement fait à l'usine, mais un programme de vérification directement sous-terre pourrait être avantageux. L'utilisation de tuyaux haute densité en polyéthylène pourrait aussi être étudiée pour certaines sections du réseau de RPC où les pressions sont plus basses comme sur les niveaux. Ce type de tuyaux s'installe rapidement, ne corrode pas, sont peu coûteux et réutilisable.

3.1.7 Contrôle-qualité du RPC à la mine LaRonde

Une des méthodes principales pour s'assurer de la qualité du remblai en pâte cimenté, c'est l'interprétation des CMS (*Cavity Monitoring System*) pour s'assurer que la dilution attribuable au RPC est minimale dans les chantiers secondaires. Un suivi est nécessaire aussi dans les chantiers de type B où la récupération du minerai se fait en deux étapes car la lentille minéralisée est particulièrement large à ces endroits.

Utiliser la méthode par *batch* permet d'ajuster le mélange plus facilement comparativement à la méthode en continu. Par contre, la méthode par *batch* génère de plus grandes variations de pressions dans le système de distribution; ce qui peut augmenter les risques de bris. La solution choisie pour pallier à ce problème, c'est l'utilisation d'une valve qui régule la distribution à la sortie du mélangeur et ainsi retient le remblai pour permettre un rythme de distribution constant. Le suivi des pressions dans le système de distribution est facilité grâce à de nombreux points de mesure en continu. Ceux-ci permettent aussi d'identifier rapidement des chutes de pressions dues à un blocage, une rupture ou à des pressions trop élevées en raison d'un affaissement insuffisant.

Lors du calcul des recettes à l'usine, les ratios des agents liants sont basés sur le tonnage sec de gâteau filtré. Il est donc primordial de mesurer précisément la teneur en eau massique du gâteau.

3.1.8 Inspection de la galerie de soutirage

Avant qu'un devis de barricade soit émis, la galerie et ses particularités sont étudiées pour valider le choix de devis. Une barricade construite par-dessus un ancien chantier remblayé dont les murs se sont élargis au-delà du 4,5 m standard privilégiera une barricade plus grande. Si le massif rocheux est très fracturé aux murs ou au toit, les dimensions de la barricade peuvent être aussi augmentées. Une vérification doit aussi être faite dans les points de soutirage adjacents pour s'assurer qu'ils ne sont pas connectés avec la galerie où la future barricade sera construite. Une fiche d'inspection est proposée en ANNEXE B – Fiche d'inspection proposée d'une barricade de stériles.

Une inspection doit aussi être faite lors des coulées du RPC et lors de la cure pour s'assurer de la conformité des devis et de l'évolution normale des barricades de stériles. Un point important, c'est le degré de fracturation qui varie d'un chantier à l'autre. Plus la fracturation est importante dans les murs autour d'un chantier remblayé, meilleur sera le drainage. Le drainage et le gain de résistance sera ainsi augmenté tout comme l'accumulation de pressions à la barricade qui sera rapide et important en début de remblayage. Ce degré de fracturation est donc bénéfique, mais demeure à surveiller. Un exemple simple de ce phénomène, c'est l'accumulation d'eau dans les bassins de rétention nettement moins importante dans le cas des chantiers secondaires (roches très fracturés) par rapport aux chantiers primaires. Deux photos prises sous-terre à la mine LaRonde permettent d'apprécier à quel point l'accumulation d'eau de drainage venant du rinçage ou du drainage d'une colonne de RPC peut être importante dans les bassins de rétention.

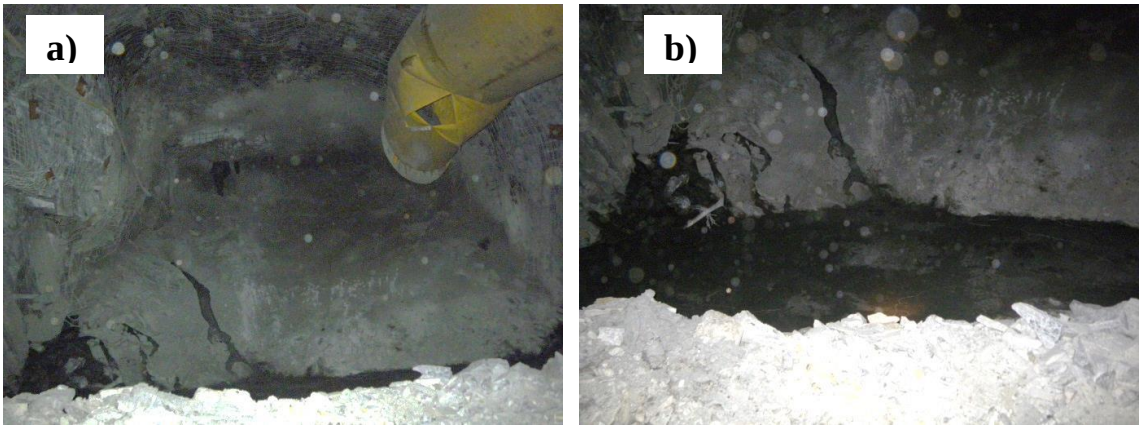


Figure 3-8: Barricade de stériles chantier primaire (mine LaRonde) : a) chemins d'écoulement d'eau de drainage, b) zoom sur le bassin de rétention presque plein de 3 m de haut.

Comme on le voit sur la Figure 3-8b, le bassin de rétention d'eau de 3 m de hauteur est complètement rempli. Ce qui est intéressant de remarquer, c'est que la protubérance gauche inférieure d'où la majorité de l'eau semble s'échapper est aussi l'endroit où la barricade est la plus épaisse. Comme quoi ce n'est pas nécessairement l'épaisseur de la barricades de stériles qui est le facteur le plus critique pour déterminer le chemin d'où l'eau va s'évacuer. La qualité de la compaction, le matériau utilisé et l'épaisseur de béton projeté est plus important. La présence de déchets (bois, supports de terrain, morceau de tubes de ventilation, clotûres) ou de vieux blocs de RPC à cet endroit peuvent aussi expliquer un meilleur gradient hydraulique localement. Il a été aussi remarqué que les murs sont nettement plus endommagés (supports arrachés et murs endommagés) au niveau de la hauteur du godet des chargeuses-navettes en mode transport. Sur la photo b), le chemin d'écoulement préférentiel se situe à cette hauteur.

3.1.9 Application du béton projeté sur le côté aval de la barricade

Le bourrage du côté aval d'une barricade de stériles est fait à la mine LaRonde avec du béton projeté de 3 po (7 cm) d'épaisseur. Le béton doit permettre de bien sceller l'ouverture entre le toit et l'enrochement sur environ 1,5 m. Celui-ci devra être mis en place de façon à remplir aussi l'espace entre le grillage et le toit. Dans le cas où du grillage ou des tuyaux gênent l'application du béton projeté, ils sont enlevés. La surface de béton doit couvrir également les murs sur 1 m au minimum à partir de l'enrochement. En général, une cure minimale de 12 heures est nécessaire avant de couler le remblai.

Une fois le béton projeté complété, un enrochement doit être placé à au moins 3 m de l'enrochement principal afin de contenir les fuites lors des coulées. L'enrochement doit avoir un minimum de 3 m de hauteur. Généralement cet enrochement est constitué de 8 à 10 godets de chargeuse-navette de 8 verges.

Comme elles sont très perméables, les barricades de stériles permettent un bon drainage de l'eau contenue dans le remblai qui permet un gain de résistance plus rapide du RPC. Malgré tout, le béton projeté curé et appliqué du côté aval de la barricade retient les stériles et empêche des phénomènes d'érosion en agissant comme un filtre. Ce filtre contribue donc à retenir le remblai qui lui aussi, tout comme l'eau et les fines, migrent à travers l'ouvrage, voir l'ANNEXE C – Développement à travers le RPC.

3.1.10 Fabrication et transport du béton projeté à la mine LaRonde

Le béton projeté à la mine LaRonde est préparé près du puits en surface dans une usine de surface de la compagnie béton Fournier. Cette usine permet de préparer différentes recettes de béton projeté ou de béton de masse. Le béton est ensuite acheminé par un réseau de tuyaux à travers le puits jusqu'au niveau 206 où il est réceptionné dans des bétonnières. Le temps de transport est très variable en fonction de la destination de la formulation particulièrement si un transfert doit être fait entre le puits Penna et le puits #4. Comme il n'y pas de ligne à béton entre les deux puits, une bétonnière doit assurer le transport entre l'arrivée du puits Penna et du puits #4. Le béton est déversé du sommet du puits vers une bétonnière qui transporte le béton frais jusqu'à la place de travail sous-terre. Ensuite, le béton projeté humide est transféré dans un équipement spécialisé qui pompe de façon pneumatique avec une haute vélocité le béton sur la surface à bétonner. Il existe deux techniques de projection, par voie sèche ou par voie humide. La deuxième méthode est privilégiée par la mine LaRonde. Les avantages de la projection par voie humide sont : l'eau de mixage est contrôlée, l'eau est bien mélangée, il y moins de perte de liants, moins de poussière, la production est plus importante et l'automatisation de la projection est possible (Hadjigeorgiou et Charette, 2009).

Le béton projeté est utilisé non seulement pour les barricades de stériles mais aussi pour de nombreuses autres applications comme la construction d'arches sous l'épaulement des chantiers, le renforcement des galeries à différents points (surtout aux intersections), la construction de murs de ventilation, dans les cheminées de ventilation, les cheminées de stériles ou de minerai et dans

le cas qui nous concerne, dans la construction de barricades de stériles. Le béton est aussi utilisé lors du développement à travers le remblai en pâte cimenté ou à travers le remblai rocheux cimenté. Le béton projeté est vital pour les mines souterraines. Dans d'autres opérations, notamment celles qui exploitent l'uranium, le béton projeté peut même servir de protecteur de rayons gamma (Sgaoula, 2001). Le béton de masse est aussi utilisé à la mine LaRonde pour différentes constructions souterraines comme des planchers ou des réservoirs.

Les commandes de la lance à béton sont situées à deux endroits : sur une télécommande ou directement dans la cabine de la pompe. Les contrôles permettent d'ajuster la quantité d'accélérant, de changer l'angle de projection, de déplacer l'embout et de faire des rotations automatiques. Les machines spécialisées pour appliquer le béton projeté ont de nombreux avantages. Elles permettent d'ajouter et d'ajuster de l'accélérant qui lui permet de diminuer les rebonds de béton de 5% à 10% en moyenne, ces machines permettent aussi de diminuer la quantité d'eau à ajouter dans le mélange; ce qui permet d'augmenter la résistance du béton. Finalement, l'utilisation de lances automatisées permette d'optimiser l'angle et la distance entre la lance et la surface où le béton est projeté; ce qui permet une application plus homogène et efficace (Watson et Keskimaki, 1992). Les commandes télécommandées permettent aussi à l'opérateur de se placer de manière optimum pour mieux voir l'embout de la lance, de mieux appliquer le béton tout en ne recevant pas d'éclaboussures et en se positionnant de manière sécuritaire (Baz-Dresch, 1991). Lors de l'application, de l'air comprimé est ajouté au béton lorsqu'il sort de l'embout. Le béton est ainsi accéléré ce qui aide la compression et l'adhérence du béton sur la surface. Ainsi, les rebonds sont diminués, la résistance en compression du produit fini est augmenté et la quantité de poussière est diminuée pour l'opérateur (Collet et van Rooyen, 1998).

Le béton projeté permet de construire une surface homogène qui confine une masse rocheuse ou un amas rocheux. Ce confinement permet que chaque bloc résiste comme un ensemble aux forces à retenir plutôt que de manière indépendante. Une relation empirique entre la rapport de la résistance de confinement uniaxiale et la résistance de cisaillement est de 0,25 (Pakalnis et al., 2010). Le point critique dans l'utilisation de béton projeté et de béton de masse à la mine LaRonde est le temps de transport du béton de la surface jusqu'à la place de travail. Au plan de la santé-sécurité, une attention particulière doit être porté notamment concernant les poussières lors de l'application. La Figure 3-9 montre la réception du béton au sommet du puits Penna dans une bétonnière, le transfert du béton de la bétonnière à la pompe et la pompe en utilisation.

Figure 3-9: Transport du béton projeté de la recette du puits à la barricade via une bétonnière (1-2) jusqu'à la lance de projection de béton (3), photos prises par l'auteur à la mine LaRonde

3.2 Granulométrie des stériles rocheux par analyse d'images

L'analyse granulométrique faite à partir d'images numériques prend de plus en plus de place dans le domaine minier. Les méthodes classiques comme le tamisage ou le criblage sont très coûteuses

et fastidieuses en plus de donner des résultats à partir de petits échantillons et d'être parfois destructifs pour certains minerais fragiles (Maerz, 1998, 1999). Désormais, il existe plusieurs logiciels pour l'analyse par images (FragScan, WipFrag et Split), mais le plus commun est celui développé par l'Université de Waterloo qui est maintenant vendu sous le nom WipFrag. Les utilisateurs les plus fréquents de ce type de logiciels sont les exploitants de mines ou de carrières à ciel ouvert. Ils utilisent l'analyse de la granulométrie par images de la roche après sautage, transport ou broyage dans une optique de réduction de coûts. L'analyse d'images peut également se faire de façon continue, par exemple sur un convoyeur de minerai, pour l'évaluation de performance de réduction granulométrique ou pour le triage optique (Planeta et Szymanski, 2010). Certaines opérations souterraines, comme la mine Coleman, utilisent WipFrag pour mesurer la fragmentation après les opérations de sautage pour éviter un pourcentage trop élevé de particules trop fines (causent la congestion des chutes) ou de blocs (broyage manuel à l'aide de marteau) et ainsi diminuer les coûts de manutention et de broyage (Langevin, 2015; Maerz, 1999; Palangio et Franklin, 1996). La mine Brunswick a aussi utilisé l'analyse par images pour déterminer le pourcentage optimal de ciment dans le remblai rocheux cimenté (Piché et al., 2000). L'analyse granulométrique par images en continu est utilisée au concentrateur de la mine LaRonde pour mesurer la granulométrie en continu.

L'utilisation de ce logiciel a par contre certaines limites quant à la représentativité des résultats. Ceux-ci sont dépendants de la qualité et du positionnement de l'éclairage, du degré de propreté des agrégats, de l'angle de l'empilement et de l'angle de la caméra (WipWare, 2015). Il faut aussi mentionner que la forme (allongée, tabulaire ou ronde), la texture et la dimension des particules ainsi que la représentativité de la photo et sa résolution auront un impact sur les résultats (Maerz, 1998; Maerz et al., 1996).

Le logiciel utilise des algorithmes pour identifier le contour de chacune des particules de roche sur l'image et mesure ensuite leurs aires (Maerz et al., 1996). Ensuite, en utilisant des principes de géométries probabilistes, WipFrag reconstruit en « dépliant » les particules une distribution granulométrique en trois-dimensions. Le logiciel tient compte aussi de la détection difficile des particules fines cachées derrière des particules plus grossières ou tout simplement trop fines pour la résolution de l'image. Malgré tout, la précision de ce type d'analyse est extrêmement variable et généralement faible. Un mauvais calibrage du logiciel en fonction du matériau peut provoquer

des erreurs qui peuvent atteindre 35% (Maerz, 1998). De manière plus générale, des tests en laboratoire ont montré des pourcentages d'erreurs plus faibles. Une première analyse, faite en laboratoire avec du calcaire, a montré une erreur de moins de 10% pour le D_{50}. Dans un deuxième essai avec du gravier, une première analyse sans calibrage montrait une surestimation du D_{50} de 20%. Suite au calibrage, le même matériau s'est approché à 4% de la valeur du D_{50} obtenu par méthodes traditionnelles (Maerz et al., 1996). Il est aussi possible d'affirmer que le pourcentage d'erreur diminue soit par un calibrage adéquat ou encore lorsque les particules sont étalées sur un tapis ou un convoyeur puisque les problèmes dus à l'empilement disparaissent (Maerz, 1999).

3.2.1 Procédure de prises de photos pour l'analyse granulométrique WipFrag

Voici la procédure établie pour la prise de photos sous-terre à la mine LaRonde pour les photos servant à l'analyse granulométrique. Cette procédure a été mise au point après plusieurs prises de photos inutilisables :

1. Choisir la meilleure définition possible sur l'appareil et ne pas faire trop de copies parce que chaque copie fait baisser la qualité de l'image ;
2. Choisir le maximum d'ouverture (ex. avec une lentille de 18-55 mm choisir 55 mm), pour avoir la vraie ouverture, dans le cas d'une caméra Nikon tel qu'utilisée dans cette étude, faire X 1,5 ;
3. Utiliser la distance focale maximum en agrandissant au maximum et en se plaçant le plus loin possible ;
4. Prendre la photo pour tenter d'être perpendiculaire à la pente de la barricade de stériles, donc se placer le plus haut possible ;
5. Viser uniquement la pente de stériles, ne pas voir sur la photo les murs ou le toit ;
6. Prendre en note le « Shutter speed ». Pour la calculer on doit prendre la distance focale effective arrondie au multiple de 10 (Ex. 55mm X 1.5 = 82.5, 1/80 sec ou plus vite) ;
7. S'assurer que la stabilisation automatique de l'appareil est en fonction ;
8. Profondeur de champ et ouverture : une ouverture minimale est de f8, mais f11 ou f16 sont de meilleurs choix. Plus le fxx augmente, plus l'ouverture est petite et la profondeur de champ sera augmentée ;

9. ISO : on doit utiliser le ISO le plus bas possible dans toute situation pour diminuer le bruit. Sinon on verra apparaître sur la photo, des genres de grains qui viennent diminuer la qualité de l'analyse ;
10. Il est recommandé, lorsque possible, d'utiliser un trépied pour limiter les problèmes liés à l'intensité ;
11. Uniformité : plus la source de lumière est éloignée, plus la lumière sera distribuée de manière uniforme; on veut limiter les ombres ou les illuminations trop fortes ;
12. Contraste : l'analyse photographique de fragments dépend des contrastes entre les particules de roche et les ombrages entre ces particules. Si le contraste est trop élevé, le logiciel va diviser certaines roches qui devraient normalement être la même particule. Si le contraste est trop faible, certains ombrages entre des fragments seront absents et des particules plus petites seront jumelées. Pour limiter ce phénomène, utiliser plusieurs sources lumineuses et ne pas les placer dans le même axe que l'appareil photo ;
13. Échelle : chaque photo doit avoir une échelle (ex. un cahier de note) suffisamment grande, plate et non déformable. Noter que l'angle du stérile présent sur la photo permet aussi de pouvoir corriger l'erreur due à l'angle du matériau par rapport à l'horizontale.

3.3 Instrumentation in situ d'un chantier long trou à la mine LaRonde

Dans cette section, les détails des instruments de mesure seront présentés. Les procédures pour la prise de données seront aussi abordées, ainsi que les résultats de la campagne.

3.3.1 Fabrication des cages en acier

Les cages d'instruments ont été fabriquées directement à la mine LaRonde. Huit cages cubiques ayant chacune 60 cm de côté et dont cinq des six faces sont couvertes de grillage ont été fabriquées. La sixième face (qui sera celle orientée vers le bas) permet l'installation des instruments à l'intérieur des cages. Quatre œillets sont installés aux coins de la face opposée à la face ouverte, voir

Figure. Les œillets serviront à attacher la cage de manière à ce qu'elle reste toujours dans le même axe.

Figure 3-10: Cage en acier utilisée pour attacher les instruments de mesure.

3.3.2 Structure d'acier pour la suspension des cages sans ancrage au toit

Après plusieurs essais non fructueux et des délais importants dans la réalisation du projet d'instrumentation, la procédure pour suspendre les cages dans le chantier a dû être revu. À chaque fois que des ancrages et des câbles ont été placés avant le sautage de production, ils ont été rendus inutilisable suite au sautage. Pour pallier ce problème majeur, un prototype de structure d'acier a été dessiné puis fabriqué pour permettre de suspendre les cages sans avoir besoin d'ancrage au toit. Le dispositif peut être ancré dans le plancher de la galerie de forage et à l'aide de poulies attachées au bout de tuyau de forage, les cages sont suspendues dans le chantier avant le début de la séquence de remblayage. Le principal avantage de ce concept présenté à la Figure 3-11, c'est qu'il peut être déplacé et réutilisé d'un chantier à l'autre.

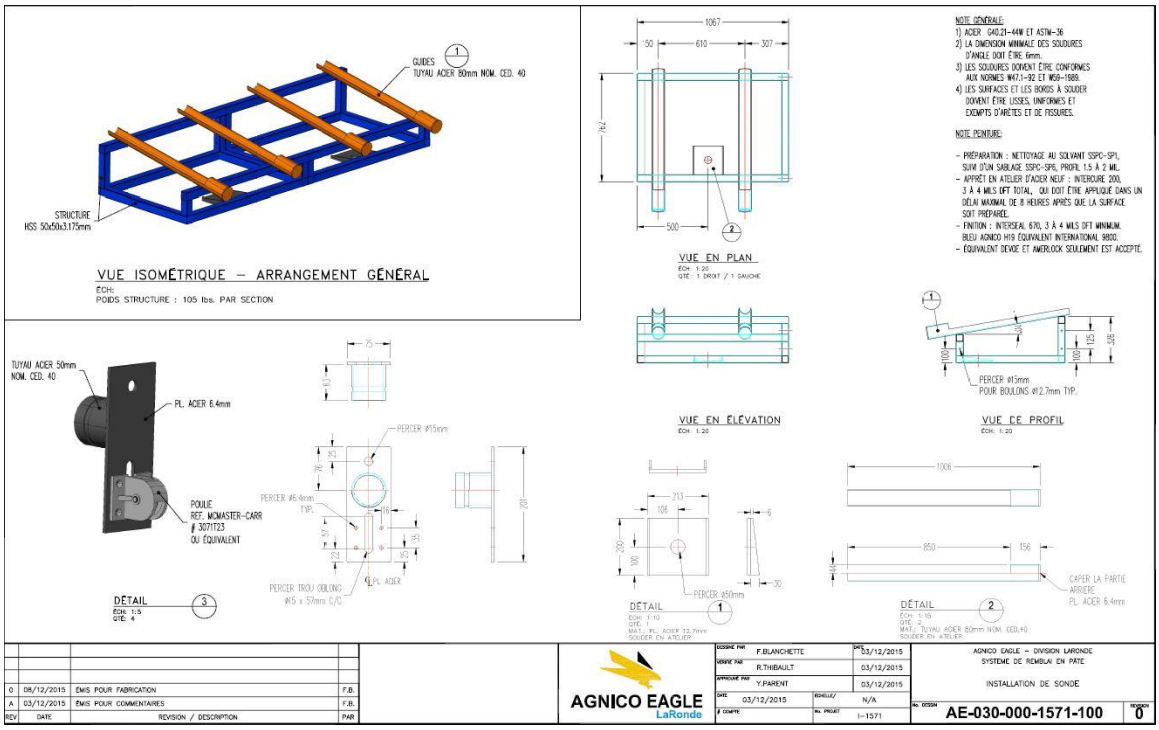


Figure 3-11: Dessin technique du prototype servant à insérer des tubes de forage et à attacher les cages à partir du plancher après le sautage de production.

Le développement de ce prototype a retardé l'instrumentation, mais a représenté toute une expérience dans la conception de prototypes et dans l'établissement d'une procédure pour réussir à tout installer. Ce concept pourra être réutilisé dans d'autres contextes d'instrumentation à la mine LaRonde.

3.3.3 Extensomètres BOR-EX

L'extensomètre de type BOR-EX permet de mesurer avec précision les déplacements le long d'une ligne dans un sol ou un massif rocheux. Ces instruments sont largement utilisés pour le contrôle de la stabilité dans les fondations de talus, de gros édifices, de tunnels, d'excavation ou de talus. En réalité, bien que soit des installations assez complexes, l'extensomètre à tiges est un instrument dont le principe est simple. Il comprend trois composantes soit :

1. Ancrages hydrauliques de type Borros;
2. Tiges d'extensions en acier inoxydable;
3. Tête de lecture comprenant un capteur de déplacement à corde vibrante.

Les déplacements entre les ancrages et la tête se mesurent directement entre la partie supérieure libre de la tige d'extension et la surface de référence comprise dans la tête de lecture. L'installation est faite par l'insertion des ancrages, tiges, tubes de protection et tête dans le forage et la fixation des ancrages et la tête de l'extensomètre. À mesure que l'ancrage se déplace en raison des pressions induites par le remblai qui comprime la barricade de stériles, ces valeurs sont transmises et enregistrés. Pour évaluer l'amplitude de ces mouvements à différents endroits dans l'ouvrage, 3 ancrages sont positionnés le long du même axe au 1/3 de hauteur de la galerie pour tenter de mesurer un phénomène de tassement dans la barricade de stériles dû aux pressions qui se développent dans le chantier. Bien que différentes tiges ou têtes puissent être choisies, en raison des particularités de cette étude, c'est la tête à ancrage hydraulique de type *Borros* qui a été choisie. Les ancrages sont reliés par un tube contenant de l'huile hydraulique et grâce à une pompe, ceux-ci s'ouvrent lorsque l'on augmente la pression. Ensuite, telle une ancre qui se déploie, grâce à la pression hydraulique, les ancrages viennent se stabiliser dans l'ouvrage. Les ancrages de type Borros sont conçus pour les sols meubles et donc tout indiqué pour les barricades de stériles. Les tiges d'extension choisies sont en acier inoxydable et un tube de protection en PVC de diamètre externe de 13,7 mm (0,5 po). Il existe plusieurs capteurs de déplacements, mais celui choisi est à corde vibrante, toutes les caractéristiques techniques sont résumées dans le Tableau 3-2. Les déplacements sont transmis via un câble de la tête du forage vers un data logger qui enregistre les données en continus.

Tableau 3-2: Caractéristiques techniques des cellules de pressions RocTest

Modèle	Corde vibrante
Fabricant	RocTest
Étendue de mesure (EM)	0 - 150 mm
Précision	± 0,375 mm
Résolution	0,03 mm
Température d'utilisation	-30°C à 65°C
Diamètre tige	6,35 mm
Filets	10-32UNF
Diamètre tube protecteur	13,7 mm

Le BOR-EX est normalement conçu pour s'insérer dans un forage de diamètre variant entre 76 mm et 100 mm (3 à 4 po) et stabilisé à l'aide d'un coulis de ciment. Comme il était essentiel de ne pas affecter la conformité des barricades de stériles, il a été décidé de ne pas injecter de coulis. De plus, comme les barricades de stériles présentent de nombreux vides, il est anticipé que l'utilisation de coulis viendrait compromettre de manière importante les réelles propriétés géomécaniques d'une barricade de stériles. Il a été posé comme hypothèse que lors de l'enlèvement de la tige de forage, les particules contenues dans la barricade se tassent et se compriment pour bien ancrer les extensomètres. L'utilisation de coulis doit servir non seulement à l'ancrage, mais aussi comme protection des tiges d'extensions qui relient les ancrages aux têtes de lecture. Comme les dimensions de l'ouvrage sont relativement petites, en comparaison par exemple avec une digue, un barrage ou un édifice, il est admis que la compression sur les tiges d'extension ne soit pas assez importante pour causer des dommages aux tiges d'extension. Pour simplifier l'installation sous terre, les tiges ont été complètement préassemblées par le fabricant RocTest.

Pour le calcul de déplacement, Roctest recommande l'utilisation de l'équation [3-1] pour faire la conversion des unités linéaires (UL) en mm en fonction des facteurs de calibration obtenus à l'usine.

$$D = AL^2 + BL + C \qquad [3\text{-}1]$$

$D = \text{Déplacement}\left(\text{mm}\right)$
$A, B, C = \text{Facteurs de calibrage fournis par le fabricant}$
$L = \text{Lecture des données}\left(\text{UL}\right)$

Les capteurs de déplacements à corde vibrante permettent de mesurer les déplacements d'ouvertures ou de fermetures de fissures de barrages, ponts, du roc, masse de béton ou à différentes interfaces. La revue de littérature a permis de déterminer que cette étude est la première tentative de mesure de déplacements dans des barricades de stériles. Comme les déplacements sont mesurés par cordes vibrantes, des ajustements doivent être faits pour tenir compte des variations de température et chaque capteur est muni d'une thermistance. La formule [3-2] permet de compenser pour l'effet de la température qui sera mesurée en continu.

$$D_r = \left(D - D_0\right) - K\left(T - T_0\right) \qquad [3\text{-}2]$$

$$Dr = \text{Déplacement relatif}\left(\text{mm}\right)$$
$$D = \text{Lecture de déplacement actuelle}\left(\text{mm}\right)$$
$$D_0 = \text{Lecture de déplacement inital}\left(\text{mm}\right)$$
$$K = \text{Coefficient thermique du capteur}\left(\text{mm/°C}\right)$$
$$T = \text{Température actuelle}\left(\text{°C}\right)$$
$$T_0 = \text{Température initiale}\left(\text{°C}\right)$$

Le coefficient thermique est choisi en fonction du Tableau 3-3 fourni par RocTest.

Tableau 3-3: Coefficient thermique en fonction de l'étendue de mesure

Étendue de mesure (mm)	**K (mm/°C)**	**(%PE/°C)**
25	-0,00825	-0,033
50	-0,062	-0,031
100	-0,026	-0,026
200	-0,044	-0,022
300	-0,057	-0,019

3.3.4 Cellules TPC

Une cellule de pressions hydrauliques consiste de deux plaques de métal soudées ensemble sur leurs périphéries et remplies d'une mince couche d'huile. Les variations de pressions appliquées sur les plaques font varier les pressions internes du fluide captées par transducteur qui lie une variation de fréquence. Cette variation de fréquences est captée par une corde vibrante qui envoie ensuite un signal électrique qui lui peut être enregistré. Ces signaux sont ensuite transformés en pressions grâce à des formules empiriques qui tiennent compte des conditions d'installations, d'un facteur de calibration et de la température à l'intérieur de la cellule. Ces formules générales de transformation de signaux électriques en pressions ont les allures suivantes (voir équation [3-3]) selon Daigle et Zhao (2003) :

$$\Delta P = CF\left(F_1^2 - F_0^2\right) - CT\left(T_1 - T_0\right) - \left(B_1 - B_0\right) \qquad [3\text{-}3]$$

ΔP = Variation de pression (kPa)

CF = Facteur de calibration (kPa/Hz^2)

CT = Facteur de calibration de température (kPa/°C)

F_1, F_0 = Lectures initiales et actuelles en Hz

T_1, T_0 = Températures initiales et actuelles en °C

B_1, B_0 = Pressions barométriques initiales et actuelles en kPa

À noter que les deux facteurs de calibration sont fournis par le fabricant des cellules. Sellers (2000) présente une équation pour corriger les pressions mesurées pour une cellule de pressions enfouies en tenant compte des variations de température, voir la formule [3-4] :

$$CT = \frac{1.5 * E * K * t}{R} \qquad [3\text{-}4]$$

CT = Facteur de calibration de température (kPa/°C)

E = Module élastique de Young du sol (GPa)

K = Coefficient d'expansion thermique du fluide dans la cellule (10^{-6}/°C)

t = Épaisseur du fluide dans la cellule (mm)

R = Rayon de la cellule (mm)

Des exemples de valeurs sont de 700 X 10^{-6}/°C pour le coefficient d'expansion thermique de l'huile et un module d'expansion de 0,345 GPa pour du sable grossier. À noter qu'il est très complexe de calculer le module de Young pour un remblai et ce module va varier aussi en fonction d'où les cellules sont placées dans le remblai puisque le degré de compaction ne sera pas le même.

Daigle et Zhao (2003) ont faits des mesures pour tenter de calculer l'effet de la température sur les pressions mesurées. Des cellules de pressions ont été enfouis dans du sable d'Ottawa à l'intérieur de chambre dont la température et la pression (huile dans le sable) étaient contrôlées à l'aide de thermomètres et de piézomètres. La chambre avait un diamètre de 380 mm et seulement la tête de la cellule était enfouie, le reste étant à l'extérieur de la chambre. Des tests ont aussi été effectués avec des cellules non enfouis (air ambiant) à l'intérieur d'une chambre tempérée. Le Tableau 3-4 présente les résultats des cellules de 228 mm à l'intérieur de chambre de 380 mm et montre les

variations de pressions en fonction des températures. On peut voir une incertitude entre 13,8 % et 42,4 % pour des cellules avec une sensibilité de 200 kPa.

Tableau 3-4: Erreurs et pressions mesurées par rapport aux pressions réelles appliquées

Cell # (range in kPa)	Applied pressure (kPa)				Apparent pressure variation (kPa) for a temperature variation of 40°C			
	P#1	P#2	P#3	P#4	P#1 (% FS)	P#2 (% FS)	P#3 (% FS)	P#4 (% FS)
3-A (200)	17.9	36.9	68.3	124.7	27.7 (13.8)	40.5 (20.2)	60.2 (30.1)	84.8 (42.4)
4-A* (750)	-	52.0	213.1	-	-	38.0 (5.1)	83.8 (11.2)	-
10-B (173)	12.6	19.1	92	-	16.1 (9.3)	18.9 (10.9)	33.8 (19.5)	-
11-B (173)	14.7	20.7	78.6	-	5.5 (3.2)	6.2 (3.6)	33.0 (19.1)	-

Pour les variations de pressions en fonction des variations de températures dans des chambres tempérées, l'effet mesuré dans le cadre de cette étude était négligeable, soit de moins de 1 kPa.

Malheureusement, la majorité des essais de Daigle et Zhao (2003) ont été faits avec de petites cellules avec une aire de 4 536 mm^2 (diamètre de 76 mm) alors que la majorité des études utilisent des cellules de 40 828 mm^2 (diamètre de 228 mm). D'ailleurs les auteurs mentionnent que les problèmes de mauvaises lectures de pressions en fonction de la température sont nettement plus importants pour les petites cellules par rapport aux grosses. De plus, ces tests (fait pour les cellules placées en surface à l'extérieur) ne sont pas tellement applicables pour des cellules enfouies dans le remblai puisque les températures étudiées (-10°C à 30°C) ne sont pas dans la gamme de température rencontrée sous terre (35°C et plus). De plus, la sensibilité des cellules testées dans cette étude n'est pas toujours de 200 kPa, ce qui correspond à celle choisie dans cette étude. Il est clair que : plus l'aire d'une cellule est grande, moins l'effet des variations de températures sera important et c'est pourquoi des cellules de diamètre de 228 mm doivent être privilégiées. Ce qui aussi assez particulier et qui explique les changements d'équations de calibration d'un fabricant de cellules à l'autre, c'est que ces cellules n'auront pas tous la même sensibilité et rigidité en fonction de la nature des composantes choisies et de la méthode de construction. Selon (Dunnicliff, 1997), il y a une distinction à faire en termes de comportement entre la sensibilité des cellules de pressions enfouies par rapport à celle placée au contact d'un mur et du béton lors de fortes

variations de température. En effet, les cellules enfouies (comme dans cette étude) sont nettement moins affectées par les variations de températures. Il est important de noter aussi que les résultats présentés dans le Tableau 3-4 sont obtenus avec des cellules de 228 mm à l'intérieur de chambre de 380 mm. Donc, le ratio de grosseur cellule-chambre est de 1,6 alors qu'un minimum recommandé est de 10 selon Dunnicliff (1993). Il faut aussi mentionner que dans les tests présentés les transducteurs qui mesurent les variations de fréquence de la corde vibrante n'étaient pas à la même température que les disques de pressions ce qui augmente probablement l'effet des variations de température. Cette disposition n'était pas rencontrée dans ces essais puisque tous les appareils étaient enfouis dans le matériel.

Les conditions barrières, le contact remblai-cellule, les dimensions de la cellule, le placement des cellules, le ratio de rigidité entre le remblai-cellule et autres facteurs ne peuvent être reproduit uniformément pour tous les remblais en pâte cimenté et toutes les cellules disponibles sur le marché (Daigle et Zhao, 2003). Une procédure complète avec un type d'essai particulier devrait être mise en place pour permettre de mieux calibrer les cellules de pressions, mais comme il s'agit probablement d'un sujet de mémoire à part entière, de tels tests n'ont pu être réalisés dans le cadre de ce mémoire. Ainsi, la validité des mesures de pressions lors des variations de températures, principalement lors de l'hydratation des liants dans le RPC demeurent discutables. Néanmoins, énormément d'informations fiables peuvent être tirées lors d'un protocole d'instrumentation tel que suivi pour ce projet de recherche. Il ne faut pas non plus négliger les informations qui peuvent être tirées de mettre dans le même graphique les pressions mesurées en fonction des variations de température pour facilement tenter de distinguer les réelles variations de pressions de celles uniquement liées aux fortes et rapides variations de température.

Les cellules de pression totales sont des cellules hydrauliques comprenant un coussin de répartition rempli d'huile et relié à un capteur de pression. Il existe des cellules de pressions de type TPC ou EPC, le modèle TPC a été retenu en raison de la grande solidité des cellules. Un risque est toujours présent qu'une roche tombe des épontes, des murs et du toit du chantier. La rigidité mécanique des TPC est élevée en raison de la très petite quantité d'huile utilisée dans la cellule. La petite quantité de liquide dans le coussin minimise la susceptibilité de la cellule aux effets de la température. La pression qu'exerce le remblai sur la cellule est transférée au coussin qui est flexible sur ses deux faces au centre mais rigide sur sa périphérie grâce à sa gorge périphérique. Cette gorge, ou rainure

entoure le coussin d'un anneau rigide qui réduit la sensibilité de l'instrument aux contraintes dans des directions qui ne sont pas normales à la face de la cellule. Un tube à paroi épaisse est soudé à la cellule de pression et permet la communication entre le coussin et un capteur de pressions. Les cellules sont mises sous vide et l'huile injectée est désaérée. Lorsque qu'une charge est appliquée sur une cellule, les variations de pressions dans le coussin sont détectées par le capteur de pression à cordes vibrantes qui transmet un signal électrique via un câble vers un système d'acquisition. Le capteur à corde vibrante est aussi muni d'une thermistance de 3 kΩ qui permet la mesure d'une gamme de température en -55°C et 85°C. Dans une optique de protection, les cellules intègrent une protection de surtension électrique. À noter aussi que toutes les composantes des cellules sont composées d'acier inoxydable de grande qualité ce qui leur confère de la souplesse et une résistance à la corrosion.

Tous les capteurs sont calibrés individuellement avec leurs propres facteurs de calibration fournis par le fabricant RocTest. Le détail des spécifications techniques sont présentés au Tableau 3-5.

Tableau 3-5: Spécification de fabrications fournies par RocTest des cellules TPC

Modèle	TPC
Fabricant	RocTest
Étendue de mesure (EM)	500 kPa
Construction	Coussin à parois semi-rigides et gorge périphérique d'assouplissement
Applications	- Sol et remblai - Contraintes dans le béton - Pression de contact
Surcharge admissible	750 kPa
Matériau	Acier Inoxydable
Type de capteur	À corde vibrante
Précision	± 2,5 kPa
Résolution	0,01 usec
Épaisseur	0,63 cm
Diamètre	23 cm

Les cellules TPC indiquent des valeurs de pression absolue qui doivent être corrigées en fonction des variations de la pression atmosphérique et de température. Les cellules sont fournies avec un coefficient de correction thermique qui sert à corriger les lectures de pression dans le cas de

variations thermiques importantes. Le fabricant a fourni dans son manuel d'instruction des formules suivantes pour corriger l'effet des variations de la température et de la pression. Comme les pressions barométriques sont stables sous terre, aucun n'ajustement n'a été fait. Les équations linéaires (formules 3-5 et 3-6) ou polynomiales (formules 3-7 et 3-8) sont présentés ci-dessous :

$$\Delta P = CF\left(L_1 - L_0\right) - CT\left(T_1 - T_0\right) - \left(B_1 - B_0\right) \qquad [3\text{-}5]$$

$$\Delta P = CK\left(F_1^2 - F_0^2\right) - CT\left(T_1 - T_0\right) - \left(B_1 - B_0\right) \qquad [3\text{-}6]$$

$$\Delta P = C1\left(L_1 - L_0\right) + C2\left(L_1 - L_0\right)^2 - CT\left(T_1 - T_0\right) - \left(B_1 - B_0\right) \qquad [3\text{-}7]$$

$$\Delta P = K1\left(F_1^2 - F_0^2\right) + K2\left(F_1^2 - F_0^2\right)^2 - CT\left(T_1 - T_0\right) - \left(B_1 - B_0\right) \qquad [3\text{-}8]$$

$\Delta P =$ Changement de pression $\left(\text{kPa}\right)$
$CF, C1, C2 =$ Facteur de calibrage (kPa/UL)
$L_0, L_1 =$ Lecture initiale à l'installation $\left(\text{UL}\right)$
$CT =$ Facteur de correction de température (kPa/°C)
$T_0, T_1 =$ Lecture de température initiale et courante $\left(°\text{C}\right)$
$B_0, B_1 =$ Lecture de pression barométrique initiale et courante $\left(\text{kPa}\right)$
$CK, K1, K2 =$ Facteur de calibrage (kPa/Hz^2)
$F_0, F_1 =$ Lecture de fréquence initiale et courante $\left(\text{Hz}\right)$

Pour convertir les lectures de fréquence en unités linéaires (UL), le fabricant propose la formule [3-9] suivante.

$$L = K\left(\frac{F^2}{1000}\right) \qquad [3\text{-}9]$$

$L =$ Lecture en mode "linear" $\left(\text{UL}\right)$
$K =$ Constante de jauge pour les cellules $\left(1{,}01156\right)$
$F =$ Lecture en mode fréquence $\left(\text{Hz}\right)$

Il est recommandé par le fabricant que les cellules adjacentes soient séparées d'une distance d'au moins 4 fois le diamètre des cellules pour ne pas que celle-ci ne s'affectent (donc ici 92 cm). En raison des contraintes techniques de grosseurs maximales des cages instrumentées, cette contrainte

n'a pas été respectée. La revue de littérature a permis de constater qu'aucune étude n'a respecté cette recommandation technique. La cellule doit être en contact uniforme et complet avec le matériel environnant pour empêcher des irrégularités de contraintes sur le coussin. Dans le cas du remblai en pâte cimenté, comme les constituants sont très fins et que la pâte est homogène, il n'y a pas d'inquiétude à ce niveau. Les cellules n'ont pas besoin d'être enfouis dans des filtres non plus pour les mêmes raisons. Dans le cas où une cellule est enfouie dans une masse de béton, un problème de contact peut survenir. Comme la cellule possède un coefficient thermique plus élevé que celui du ciment, le béton prend de l'expansion durant la cure du ciment et lorsqu'il se refroidit, la cellule n'est plus contact. Comme le pourcentage de liant est nettement plus faible dans le cas du remblai en pâte comparativement au béton de masse, il est possible de supposer que ce phénomène est négligeable.

Pour pallier au problème d'élongation différentielle des câbles, la tension dans les câbles a été réduite au minimum. Concernant la longueur des câbles, le fournisseur est très confiant qu'il n'influence pas les mesures.

Quatre types de corrections des pressions mesurées par des cellules de pression ont été étudiés par Tesarik et al. (2006) dans trois opérations : Turquoise Ridge, Fidel Creek et Lucky Friday. Ils ont étudié la correction par utilisation d'équations polynomiales, de facteurs fournis par le manufacturier, des facteurs déterminés théoriquement et la correction linéaire. Leurs résultats tentent à démontrer que les écarts entre les pressions mesurées et les pressions réelles sont associées au fait que les corrections tiennent compte uniquement du transducteur de pression et non pas de l'instrument au complet. De nombreux facteurs peuvent affecter la précision des mesures prises par les cellules de pressions. La géométrie de la cellule, les procédures d'installation, l'application de charges sur des cellules de manière non-uniforme et la température sont des facteurs clés à considérer pour obtenir des valeurs précises et fiables.

Ils proposent la formule [3-10] pour déterminer de manière analytique le facteur de correction qui tient compte de la totalité de l'instrument plutôt que d'utiliser le facteur de correction fournit par le fournisseur.

$$C = \frac{1{,}5 * E * K * D}{R} \qquad [3\text{-}10]$$

$C = \text{Facteur de correction}\left(Pa / °\text{C}\right)$

$C = \text{Facteur de correction}\left(Pa / °\text{C}\right)$

$E = \text{Module élastique de Young}\left(Pa\right)$

$K = \text{Coefficient d'expansion thermique de l'huile interne } (1 / °\text{C})$

$D = \text{Épaisseur du film d'huile dans la cellule}\left(mm\right)$

$R = \text{Rayon de la cellule } (mm)$

Les tests effectués à la mine de Turquoise Ridge ont été faits par des cellules de pression placés sous une couche de béton projeté. De larges écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles ont été attribués à un mauvais ajustement des valeurs. Par contre dans le cas de cette étude, les liens avec les mesures *in situ* prises dans le RPC comme c'est le cas pour le projet de LaRonde sont difficiles à faire. En effet, RocTest recommande désormais une installation particulière des cellules de pressions dans le béton projeté. Un embout est placé à l'extrémité des cellules pour permettre la réintroduction d'huile une fois le béton curé pour assurer un contact franc entre la cellule et le béton projeté. De plus, comme le ratio eau/ciment est nettement plus élevé que dans le remblai, les élévations de température et le rythme de changement est largement inférieur à ceux observés dans l'étude de Turquoise Ridge. Finalement, la fabrication de cellules EPC (Turquoise Ridge) est différente de celles des TPC (projet LaRonde) et donc la comparaison est plus périlleuse.

Les tests effectués dans la mine de charbon de Foidel Creek, opération qui mine par la méthode de longues tailles, a été fait avec des EPC placé eux-aussi à l'intérieur de béton projeté. Comme dans le cas de la mine de Turquoise Ridge, les EPC choisis pouvait supporter de très hautes charges, dans ce cas-ci 6,89 MPa plutôt que 750 kPa dans le cas de celles choisies pour l'instrumentation de la mine LaRonde. La précision est donc affectée puisque plus la gamme de mesure est grande, moins l'instrument sera précis. Le choix de cellules avec une grande gamme de mesure est justifié par le fait que ce projet se passe à de grandes profondeurs et que des contraintes importantes dans le massif transmis aux cellules via le béton projeté sont anticipées. Dans ces études, des thermistances ont soit été ajoutées dans quelques cellules ou elles étaient absentes ce qui rend les modifications de données en fonction de la température plus difficile. Les nouveaux modèles de cellules comme celles choisies dans le cadre de l'étude de la mine LaRonde étaient toutes équipées de thermistance sans exception.

Pour l'étude de la mine Lucky Friday, ce sont encore des cellules EPC qui ont été choisis plutôt que des celles TPC. Une correction de température a été faite en fonction de la moyenne des valeurs mesurées par deux thermistances plutôt que de corriger chacune des cellules différemment en fonction de valeurs de température mesurées localement.

À la lumière de l'analyse que permet cette étude sur les variations des pressions mesurées en fonction des variations de température, il est clair qu'il n'existe pas de règles claires pour l'ajustement des données. Il ne semble pas y avoir de meilleure façon pour corriger les valeurs de pressions mesurées par les cellules de pressions. La correction, par utilisation d'équations polynomiales ou par des facteurs fournis par le manufacturier ou encore par des facteurs déterminés théoriquement ou finalement grâce à la correction linéaire, dépend de plusieurs facteurs et toutes les méthodes ont montrés de meilleurs résultats dans différents contextes. Deux conclusions claires et importantes ressortent par contre de cette étude. La mise en graphique des pressions mesurées dans le temps en fonction des variations de température est la meilleure méthode pour évaluer les impacts de variations de température. En définitive, l'effet des variations de température sur les cellules de pressions sera toujours présent et il n'existe pas de méthode pour éliminer ces effets. Malgré tout, certains avancements ont été faits par les manufacturiers de cellules pour diminuer la sensibilité des cellules à la température. Notamment, des tiges de réinsertion d'huile pour favoriser les contacts après le retrait de béton projeté et des thermistances internes dans toutes les cellules. Comme le rappellent Williams et al. (2001), bien que la température varie avec l'hydratation du RPC, il ne faut pas trop s'inquiéter. En effet, si les pressions varient énormément, l'incertitude associée avec la variation de température est négligeable.

3.3.5 Piézomètres

Le piézomètre à corde vibrante PW est conçu pour la prise de mesures de pressions interstitielles dans des fluides. Ce type de piézomètre est constitué d'un corps cylindrique rigide qui protège la partie sensible du capteur de pression et la thermistance. Le capteur consiste en un diaphragme de faible épaisseur sur lequel est fixée une fine corde d'acier. La partie externe du diaphragme est en contact avec le fluide environnant et les variations de pressions le déforme et modifie en même temps la tension sur la corde. La tension mesurée est directement proportionnelle au carré de la fréquence de la résonnance de la corde. Lorsqu'une lecture se produit, une tension électrique est

appliquée à une bobine et à un électroaimant qui excite la corde dans une gamme de fréquences incluant celle de résonnance. Comme la corde est excitée, elle se met à vibrer et cette vibration induit une tension dans l'électroaimant qui génère un signal. Ce signal est ensuite amplifié et épuré des fréquences dites harmoniques pour qu'il ne reste que la fréquence de résonnance de la corde. Ensuite, grâce à la relation [3-11], une déformation est mesurée. Pour protéger l'intérieur du capteur contre les infiltrations d'eau, celui-ci est munis de connecteurs étanches, de joints toriques et remplis par un composé à base d'époxy. Toutes les composantes des piézomètres sont composées d'acier inoxydable de grande qualité ce qui leur confère une excellente résistance à la corrosion. Le filtre choisi pour cette étude est en acier inoxydable avec basse pression d'entrée air, soit d'environ 10 kPa. Le diamètre des pores est d'environ 50 µm. Ce type de piézomètre ne permet pas de mesure de succion, autorise l'infiltration d'éléments fins, est facile à saturer et a un temps de réaction court.

$$\varepsilon = K\frac{10^9}{N^2} \qquad [3\text{-}11]$$

$\varepsilon =$ Déformation (microdéformations)
$N =$ Période de la vibration (microsecondes)
$K =$ Constante de la jauge fournie par RocTest

Une feuille d'étalonnage a été fournie par le fabricant pour chacun des piézomètres utilisés ce qui permet de faire la conversion des lectures brutes en mesures de pression et de corriger les effets de la température.

Dans le cas où la relation polynomiale est utilisée pour convertir les lectures brutes en mesures de pression, le coefficient C' de la feuille d'étalonnage doit être calculé (formule [3-12]). En effet, cette valeur varie puisque la température et de la pression barométrique dans un chantier remblayé est différente de celles à l'usine de fabrication.

$$C' = -A * L_0^2 - B * L_0 \qquad [3\text{-}12]$$

$C' =$ Nouveau facteur d'étalonnage
$A, B =$ Facteurs d'étallonage d'usine
$L_0 =$ Lecture initiale (UL)

Deux différentes relations (formule [3-13] et [3-14]) sont calculées pour convertir les valeurs enregistrées en unités linéaires vers des valeurs de pressions en kPa.

$$P = C_f \left(L - L_0 \right) \qquad [3\text{-}13]$$

$P =$ Pression (kPa)
$C_f =$ Facteur d'étalonnage fournis par RocTest
$L =$ Lecture (UL)
$L_0 =$ Lecture initiale (UL)

$$P = A * L^2 + B * L + C' \qquad [3\text{-}14]$$

$P =$ Pression (kPa)
$L =$ Lecture (UL)
$A, B =$ Facteurs d'étallonage d'usine
$C' =$ Constante (kPa)

Les coefficients de dilatation thermique de la corde vibrante et du capteur sont très similaires ce qui contribue à diminuer les effets liés aux changements de température et de pressions. Néanmoins, la relation [3-15] permet d'appliquer une correction pour compenser les variations de conditions lors de la prise des prises de mesures et augmenter la précision.

$$P_c = P - C_T \left(T - T_0 \right) - \left(S - S_0 \right) \qquad [3\text{-}15]$$

$P_c =$ Pression corrigée (kPa)
$P =$ Pression non corrigée (kPa)
$C_T =$ Facteur thermique fourni par RocTest (kPa/°C)
$T =$ Température $(°\text{C})$
$T_0 =$ Température initiale $(°\text{C})$
$S =$ Pression barométrique (kPa)
$S_0 =$ Pression barométrique initiale (kPa)

3.3.6 Inclinomètres biaxiaux

Pour l'instrumentation des cages et s'assurer de la verticalité des installations, des inclinomètres bi axiaux robustes ont été installés sur chacune des huit cages. De cette manière et compte tenu de la procédure d'installation, il est possible de mesurer la rotation et les mouvements de la cage dans le remblai en pâte cimenté de manière continue durant toute la période de collecte de données. L'inclinomètre peut mesurer des variations d'angle de l'ordre de plus ou moins 10 degrés selon deux axes. La compagnie Slope Indicator qui a fourni ces instruments, calibre individuellement chacun des instruments avec un facteur de calibration y est associé. L'équation [3-16] tirée du manuel du fabricant, permet de convertir les volts enregistrés en mm/m.

$$Incli_{mm/m} = C_9Vo^3 + C_8Vo^2 + C_7Vo + C_6 + C_5Vo^2TC + C_4VoTC + C_3TC + C_2TC^2 + C_1TC^3 + C_0VoTC^2 \qquad [3\text{-}16]$$

$$\begin{aligned} &[C_0 - C_9] = \text{Facteurs fournis par le fabricant} \\ &Vo = \text{Lecture de l'inclinomètre (Volt)} \\ &TC = \text{Température interne de l'appareil (°C)} \end{aligned}$$

Une fois la valeur obtenue en mm/m grâce à l'équation [3-16], la formule [3-17] permet de convertir cette valeur en degrés d'inclinaison.

$$Inclinaison° = Arcsin\left(\frac{Inclinaison_{mm/m}}{1000}\right) \qquad [3\text{-}17]$$

3.3.7 Cellules Decagon 5TE

Ce type de cellule a été choisi comme elles sont très pratiques puisqu'elles permettent de mesurer de manière simultanée, la conductivité électrique, la teneur en eau et la température du remblai. Le résumé des principales spécifications techniques de ces capteurs sont présentés dans le Tableau 3-6.

Tableau 3-6: Principales caractéristiques techniques des sondes 5TE de Decagon

Teneur en eau volumique	**Modèle**	Decagon 5TE
	Plage de mesure	0 à 100%
	Précision	± 0,02 cm^3/m^3 ± 2% TEV
	Résolution	0,5 % TEV
Température	**Plage de mesure**	-40,0°C à 60,0°C
	Précision	0,1°C
	Volume d'influence	0,3 L
	Vitesse de mesure	150 ms

Decagon mentionne dans son catalogue technique, que ces capteurs peuvent être utilisés avec des câbles stéréo jusqu'à 75 m de long sans compromettre la précision. Comme le montre la Figure 3-12, les câbles d'origine des cellules fournies par le fournisseur étant trop courtes, des câbles plus longs ont été installés.

Figure 3-12: Installation d'extension de câbles stéréo pour augmenter la longueur des câbles des cellules 5TE.

3.3.8 Enregistrements des données en continu

Pour enregistrer toutes les valeurs lues par les différents appareils, deux dataloggers de la compagnie Campbell Scientific ont été placés dans le point de soutirage et la galerie de forage.

Une carte microSD placée dans chacun des appareils a permis d'enregistrer toutes ces valeurs prises à toutes les minutes. Le logiciel d'acquisition de données LoggerNet a permis le transfert des précieuses données des dataloggers vers un portable et la création d'un fichier Excel. Le traitement des données et les ajustements de valeurs pour tenir compte des facteurs de calibration, variation de température et pressions a aussi été fait grâce au logiciel Excel. Le choix de ce type de datalogger a été fait en fonction de la grande versatilité de ces data logger pour enregistrer différents types de données (corde vibrante, thermistance, cellules de pressions, voltmètres et transducteurs de pressions). Ils sont aussi facilement reprogrammables et ils pourront donc être utilisés dans d'autres projets variés d'instrumentation (Williams et al., 2001).

3.3.9 Procédure d'installation de l'instrumentation des chantiers

La Figure , la Figure et la Figure 3-15 montrent la planification initiale d'instrumentation qui a été suivi en partie due aux difficultés liées avec les contraintes de la production. En effet, 6 tentatives différentes entre le mois de juillet 2016 et juin 2017 ont dû être tentés pour réaliser l'instrumentation. Trois chantiers ont dû être abandonnées suite à la destruction des ancrages au toit durant le sautage de production. Deux options ont dû être oubliés suite à l'accrochage par de la machinerie des câbles et finalement une dernière option due à la dégradation importante du massif rocheux en bordure du chantier. Plusieurs éléments étaient considérés dans le choix d'un chantier à instrumenter :

- Chantier primaire prévu d'être remblayé avec du RPC ;
- Verticalité du chantier pour pouvoir suspendre les cages de manière verticale ;
- Chantier primaire et barricade dans la séquence qui peuvent rester inchangés pendant au moins 1 mois ;
- Point de soutirage assez grand pour pouvoir installer les extensomètres comme les sections de tuyaux soudés font 20 pieds de long ;
- Entrée du point de soutirage pas trop en courbe pour avoir une compaction représentative ;
- Disponibilité du technicien en remblai ou de l'ingénieur en remblai pour pouvoir compléter l'installation des cages ;
- Disponibilité de l'équipe de construction du sous-terre pour l'installation des extensomètres dans la galerie de soutirage.

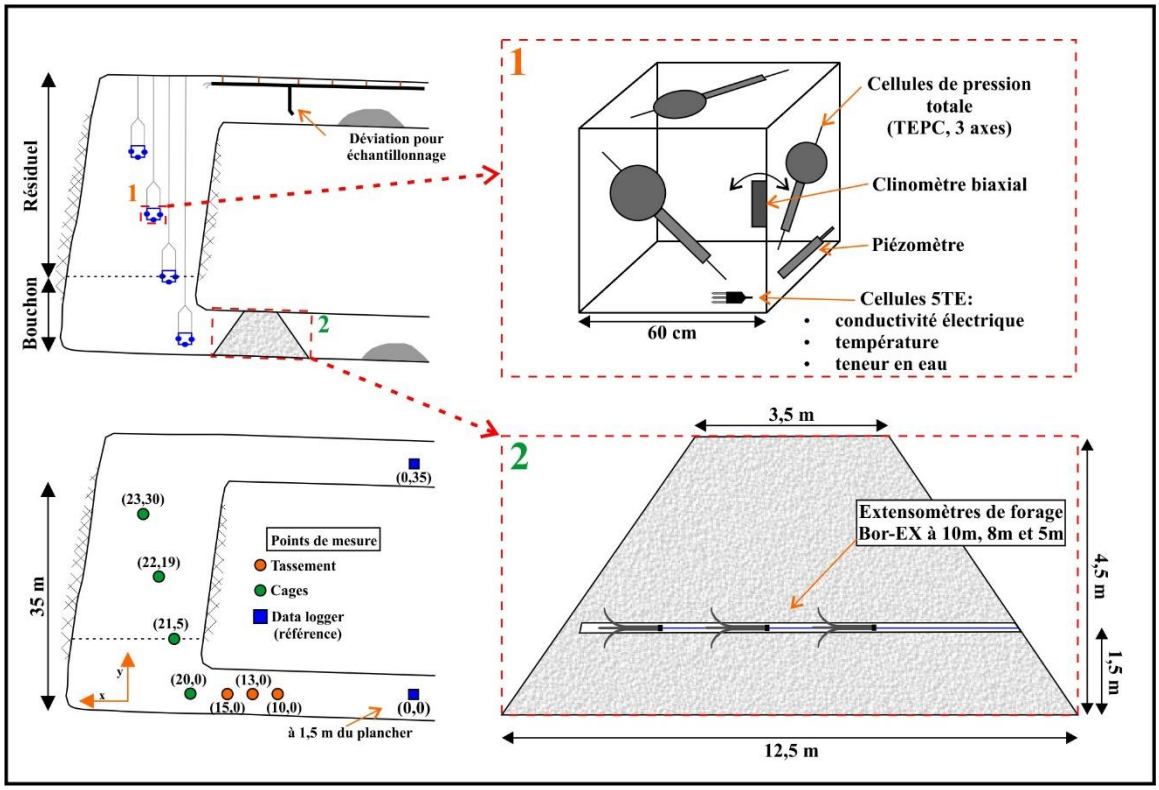


Figure 3-13: Coupe simplifié d'un chantier présentant l'emplacement prévu de chacun des instruments de mesures.

Finalement, en tenant compte de toutes ces contraintes après presque un an, comme il n'y avait jamais toutes ces conditions de remplies, un choix a dû être fait. Il faut rappeler aussi que la maitrise doit pouvoir se compléter dans des délais raisonnables. La contrainte d'horaire de tous les acteurs impliqués a été très difficile à suivre. Il faut savoir que tous les chantiers sont planifiés d'avance et la disponibilité du remblai est planifié en même temps. Finalement, l'instrumentation de la barricade rocheuse a dû être abandonné puisqu'il était trop difficile de tout coordonner. C'est l'une des raisons pourquoi l'aspect modélisation a été ajouté à ce mémoire. Malgré tout, tous les instruments et la procédure sont demeurés sur place et l'équipe d'ingénierie pourra décider à tout moment d'aller de l'avant avec l'instrumentation.

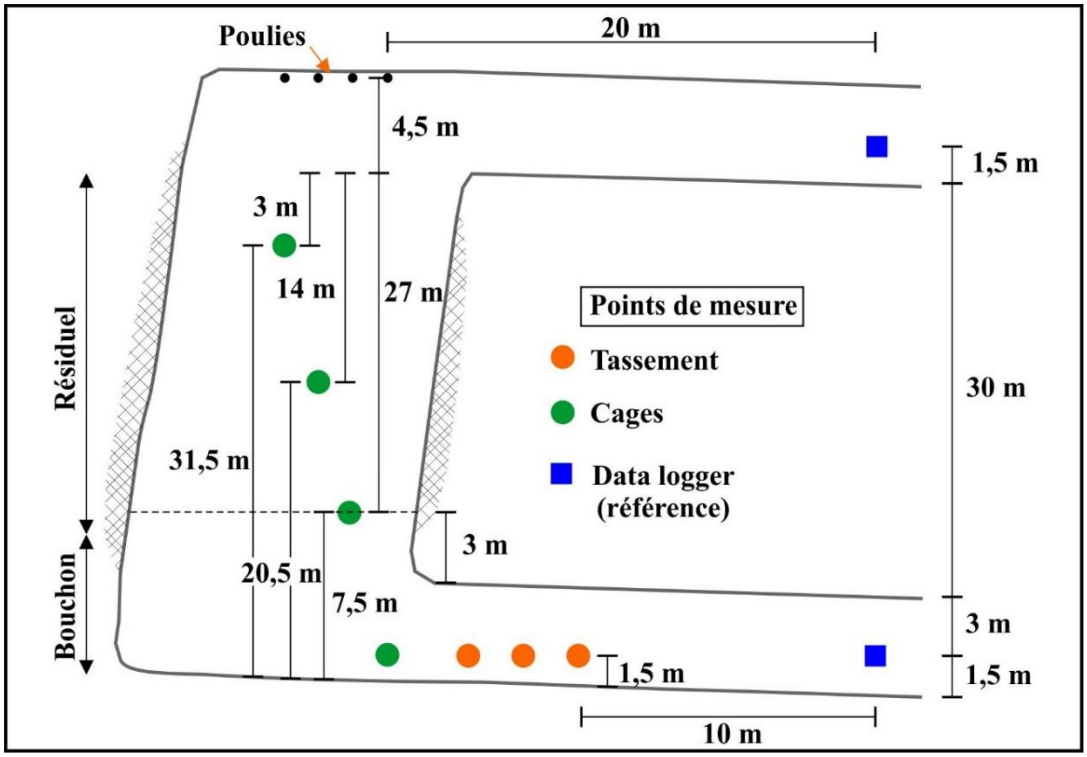


Figure 3-14: Coupe simplifié montrant la disposition spatiale des points de mesures.

Bien que l'instrumentation de la barricade ait avorté, tout ce qui était prévu dans le chantier a été tenté tel que prévu.

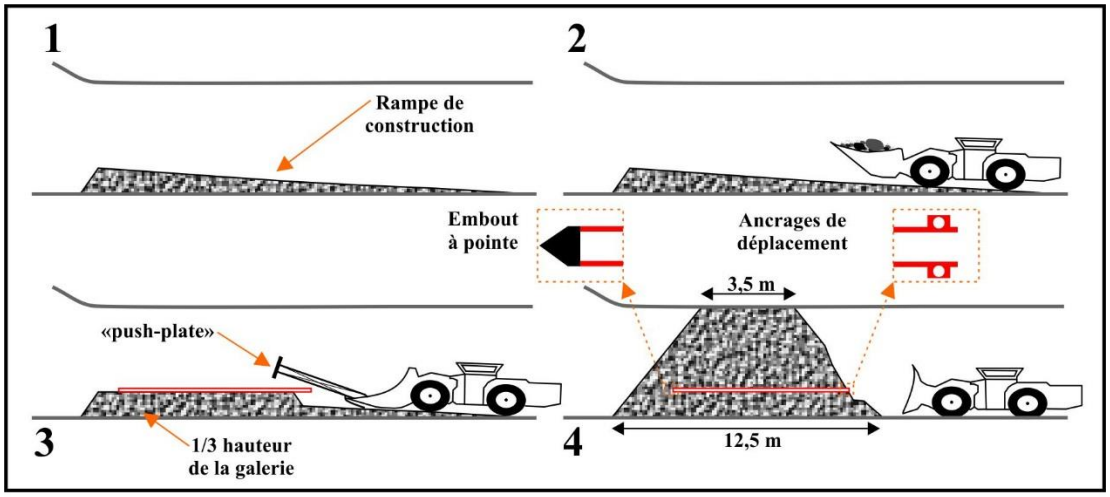


Figure 3-15: Coupe en 4 temps de la procédure proposée pour le placement d'une tige de forage dans une barricade de stériles, nécessaire pour le placement des extensomètres.

3.3.10 Calibrage des instruments

Pour s'assurer de la validité et de la précision des mesures prises par les extensomètres, les sondes DECAGON, les cellules TPC et les piézomètres, chaque instrument a été préalablement calibrés en laboratoire. La procédure de calibrage et des tests de connexions ont aussi été fait à l'UQAT préalablement à l'instrumentation pour tout valider le fonctionnement des équipements.

3.3.11 Période et rythme d'acquisition de données

L'acquisition des données en continu avec un pas de temps de une minute a été effectuée sur une période de 30 jours. Par la suite, le datalogger a été débranché et pourra être utilisé pour l'acquisition des données d'un autre projet d'échantillonnage.

3.4 Méthodologie pour la modélisation numérique

La démarche adoptée pour la modélisation numérique a été de rassembler toutes les données d'entrée nécessaires pour la construction d'un modèle numérique FLAC^{3D} en tentant de se rapprocher le plus possible de la réalité souterraine. Le logiciel FLAC^{3D} est un code de calcul basé sur la méthode des différences finies explicites, qui permet de modéliser des comportements complexes en milieu continu en 3 dimensions. Les modèles numériques présentent de nombreux avantages par rapport aux modèles analytiques. Les codes numériques permettent de résoudre des problèmes complexes en utilisant différentes lois de comportements des matériaux, de multiples paramètres d'entrées et des conditions aux limites variables. L'inconvénient c'est que la construction de modèles 3D peut s'avérer très fastidieuse et infiniment complexe.

3.4.1 Mise en contexte de la modélisation avec FLAC^{3D}

Afin de simplifier la modélisation de départ, la géométrie d'un chantier long trou a été subdivisée en deux parties : i) la galerie de soutirage contenant la barricade en roches stériles et ii) le chantier ouvert lui-même qui sera remblayé avec du remblai en pâte cimenté (RPC). La Figure présente un exemple de chantier long trou « typique » qui est nettement plus complexe à modéliser que si l'on le subdivisait en deux sous-modèles.

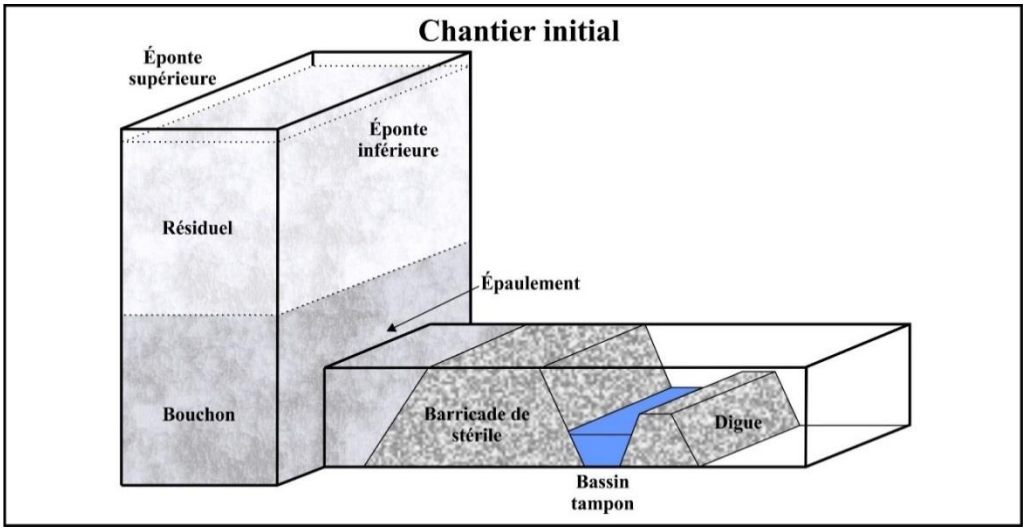


Figure 3-16: Schéma d'un chantier classique remblayé.

3.4.2 Géométries du modèle numérique

Le modèle géométrique du chantier a donc été subdivisé au départ en deux sous-modèles. Le premier (appelé **Modèle 1**) qui contient la galerie de soutirage et la barricade de stériles. Le deuxième (appelé **Modèle 2**) qui contient le bouchon et la masse de remblai d'un chantier remblayé à l'aide de remblai en pâte cimenté. Puisque ces modélisations devraient être réalisés lors de mon séjour de 5 semaines à Nancy, le travail a été surtout concentré sur le **Modèle 1**, pour finalement combiner les deux modèles et obtenir le **Modèle 3**.

Comme on peut voir sur la Figure qui montre la géométrie du **Modèle 1**, différents paramètres peuvent être introduits dans le code numérique FLAC^{3D}. De la manière dont le code a été écrit, des paramètres d'entrée, comme montré sur la Figure , peuvent être facilement modifiés. Une fois ces paramètres entrés, 27 blocs ont été générés puisque les coordonnées de chaque bloc sont définies de manière paramétrique.

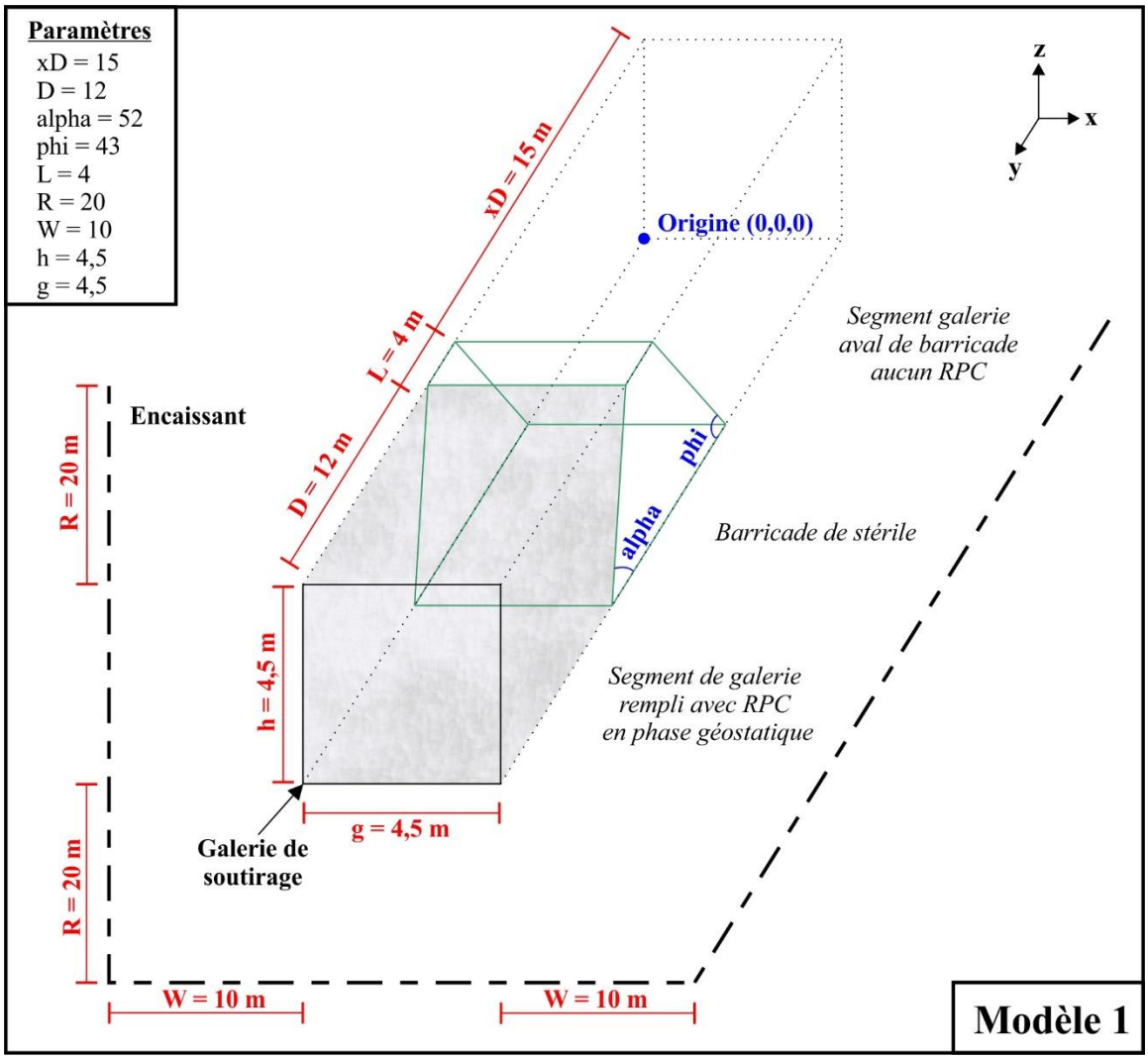


Figure 3-17: Géométrie du **Modèle 1** avec les paramètres d'entrée modifiables.

Les Figure , Figure 3-19 et Figure présentent, avec des vues en coupe et en plan, la logique du positionnement des sommets des blocs qui forment le **Modèle 1**.

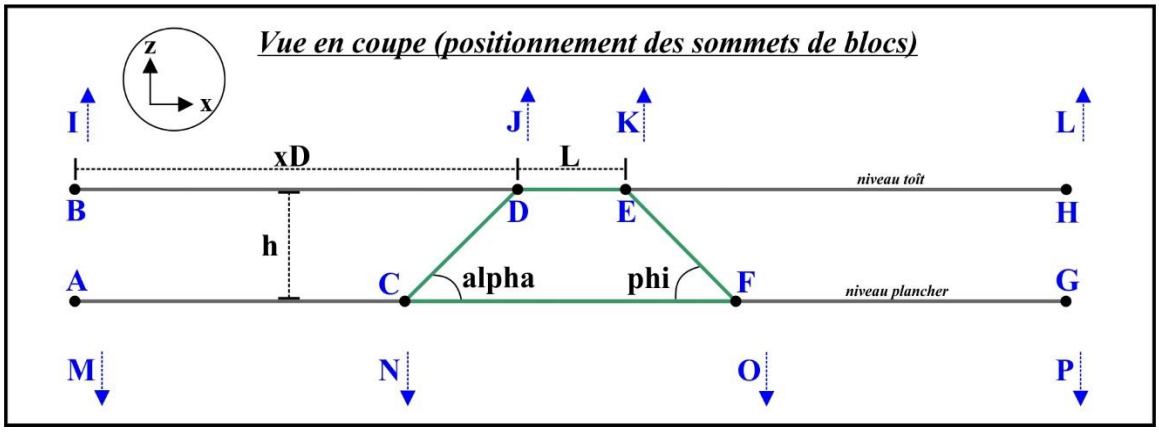


Figure 3-18: Positionnement de différents points permettant la génération de blocs.

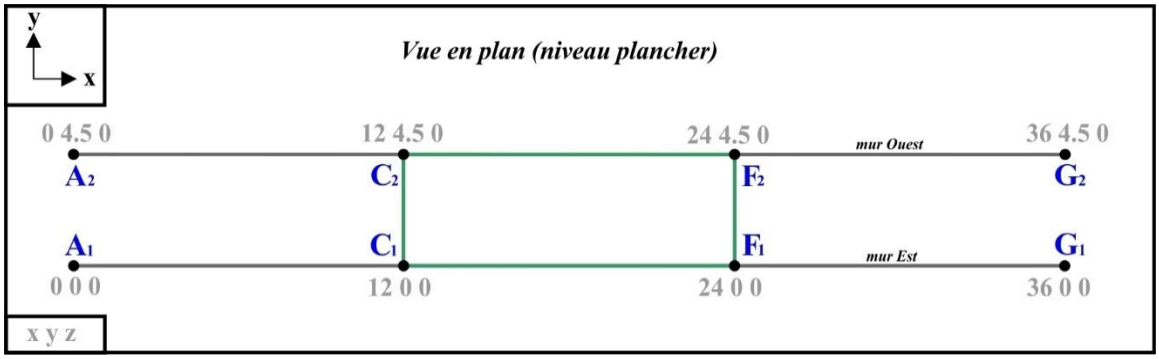


Figure 3-19: Positionnement de différents points au centre du modèle, non visible sur cette figure, les lignes A_0, C_0... et A_3, C_3 qui ferment le modèle à l'Ouest et à l'Est.

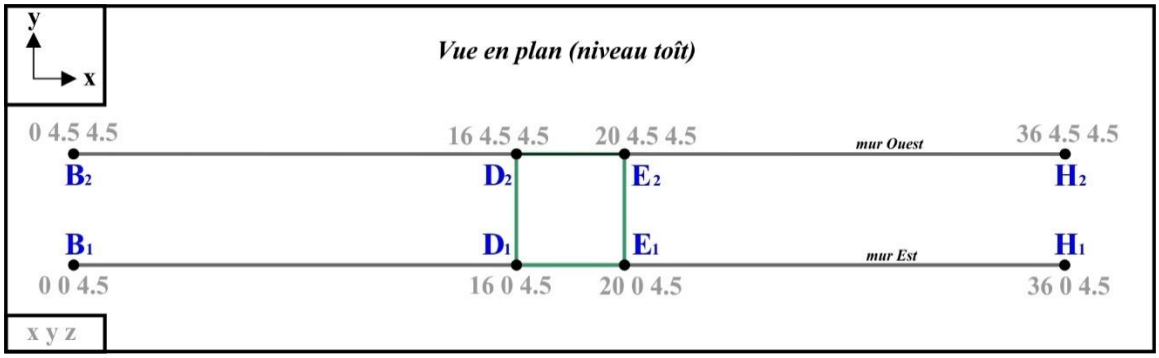


Figure 3-20: Positionnement de différents points au centre du modèle, non visible sur cette figure, les lignes B0, D0... et B3, D3 qui ferment le modèle à l'Ouest et à l'Est.

La Figure montre les traces de calcul pour la création d'une géométrie de couche de béton projeté. Cet ajout aurait pu être fait au **Modèle 1**, mais la contrainte de temps ne l'a pas permis. Dans les calculs présentés sur la Figure 5-6, phi est égal à alpha, soit de 45 degrés, mais tout comme dans le reste du **Modèle 1**, les coordonnées des points devront être ajustées en fonction des angles entrés dans le modèle.

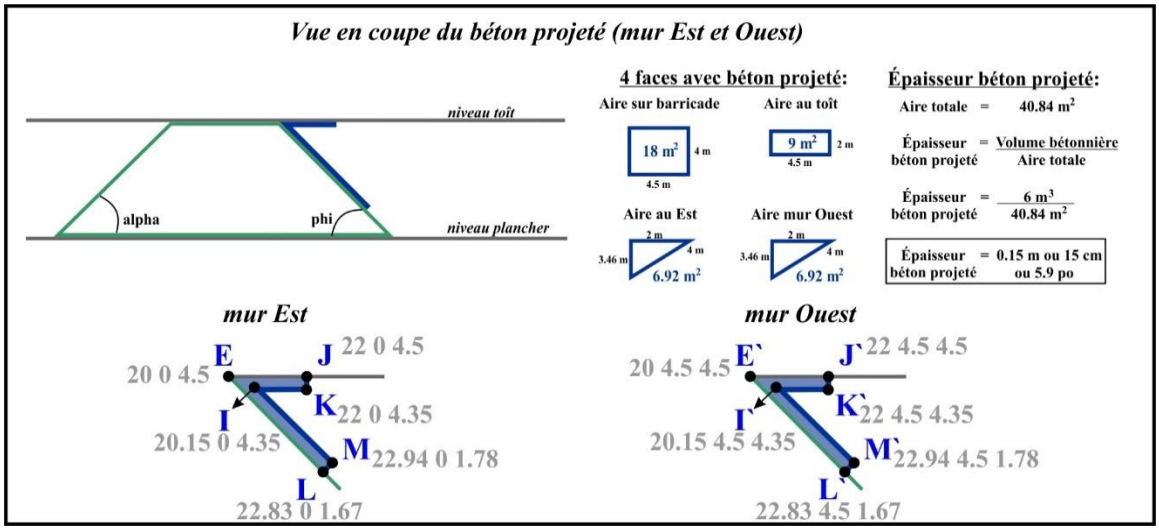


Figure 3-21: Vue en coupe du positionnement d'une couche de béton projeté du côté aval d'une barricade de stériles.

Dans le cas du **Modèle 2**, c'est la contrainte de temps qui a limité la possibilité de faire une modélisation. Ce modèle avait pour objectif principal de simuler l'évolution des pressions au cours du temps, particulièrement au-delà de 12 heures suivant le début du remblayage. Cette modélisation nettement plus complexe pourra néanmoins être débutée par un futur étudiant. De plus, comme les tests *in situ* sont terminés depuis l'été 2016, les valeurs mesurées permettront de mieux calibrer ce modèle.

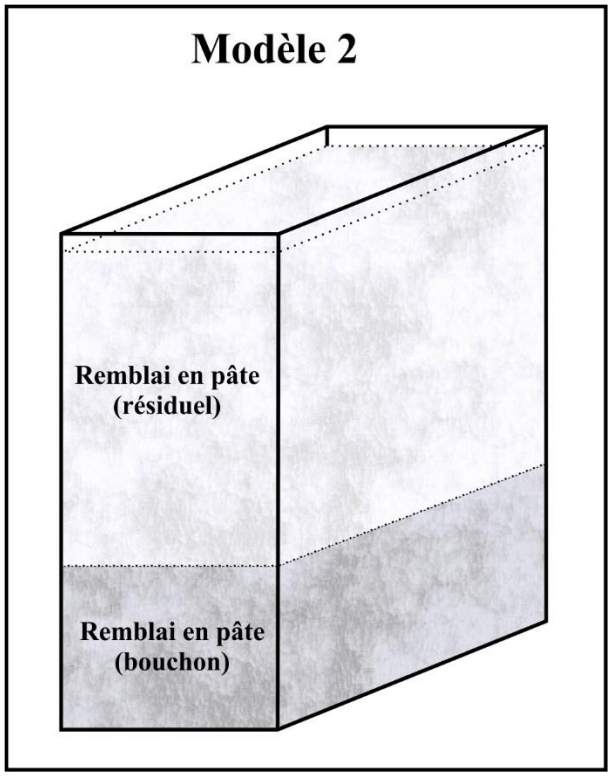


Figure 3-22: Schéma simplifié du **Modèle 2** qui se concentre uniquement sur un chantier remblayé avec du RPC.

Suite aux premiers calculs effectués avec le **Modèle 1**, il était évident que l'absence de chantier avait un impact trop important sur les mesures. Une extension a donc été ajoutée pour éloigner les conditions aux limites du point d'intérêt. La Figure présente les conditions aux limites et la géométrie du **Modèle 3**.

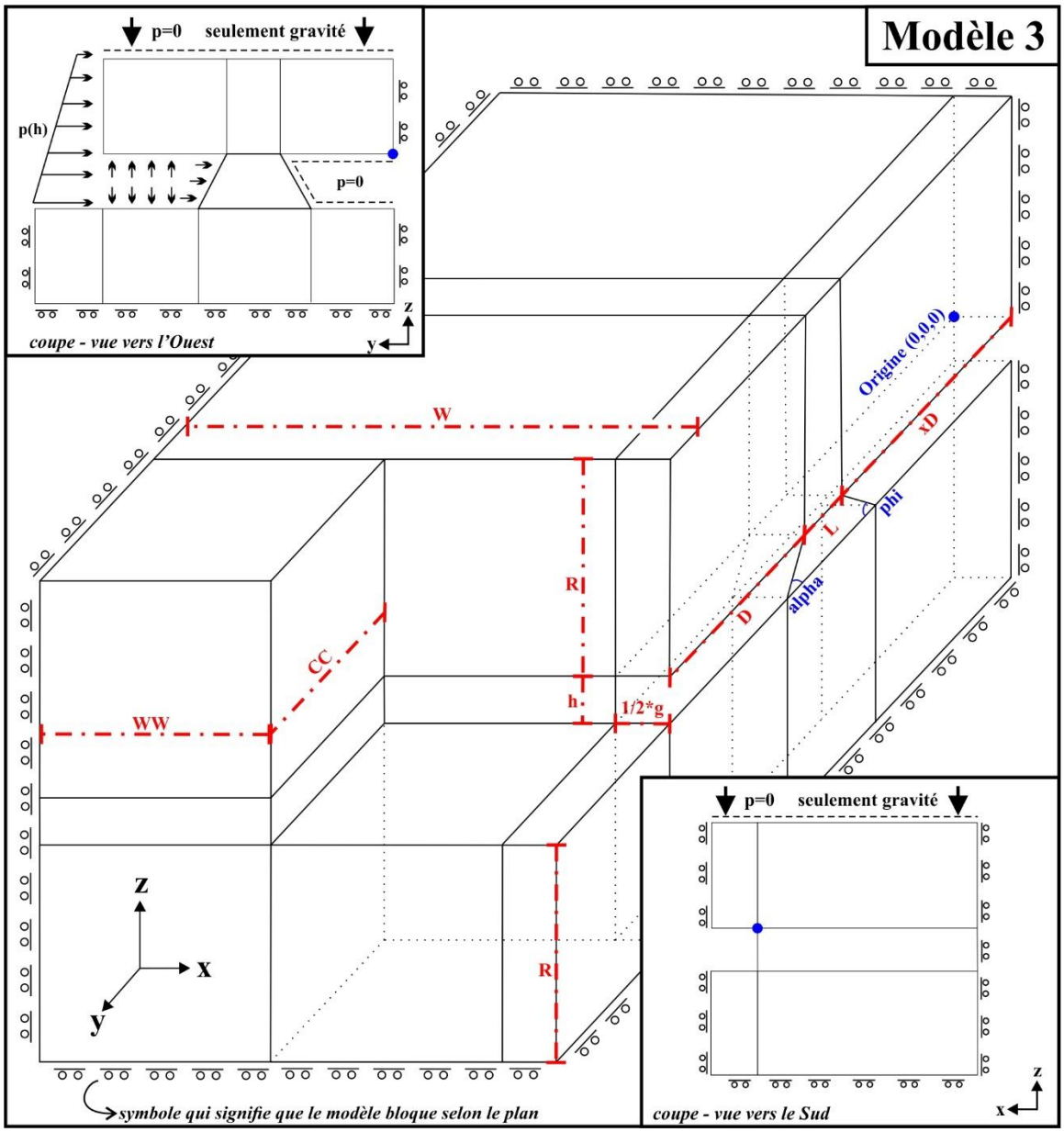


Figure 3-23: Schéma représentant le **Modèle 3** qui tient compte de la présence d'un chantier. Les plans bloqués et les paramètres sont présentés, l'ensemble comprend 23 blocs générés à partir de 184 sommets qui sont calculés de manière paramétrique avec les données d'entrée.

Dans cette modélisation, la taille du maillage et l'emplacement des conditions limites de chaque modèle construit avec FLAC^{3D} ont été adaptés pour obtenir des résultats représentatifs à ce qui est rencontré sous terre. Les maillages ont aussi été ajustés pour obtenir plus de précision dans les zones de plus grand intérêt (éponte supérieure du chantier, épaulement, point de soutirage et barricade). Un endroit plus difficile pour le maillage était la barricade comme sa forme n'est pas

carrée. Comme le modèle était symétrique sur le plan de l'axe « y », il a été possible de le tronquer au milieu « g/2 », de cette façon les temps de calcul étaient divisés par deux. Le nombre de mailles varie en fonction de la géométrie de chacun des blocs, ainsi chaque modélisation n'a pas un nombre de mailles identiques. Les valeurs de « R » et de « W » ainsi que l'extension du modèle ont été choisies pour que les points qui sont fixés n'aient pas d'impact significatif sur les zones où les mesures sont plus d'intérêts.

La Figure présente le **Modèle 1** qui est valable lors de la phase critique que subit la barricade de stériles, c'est-à-dire, lorsque que les pressions seront maximales, en début de remblayage (les premières 12 h), dans la phase géostatique du RPC.

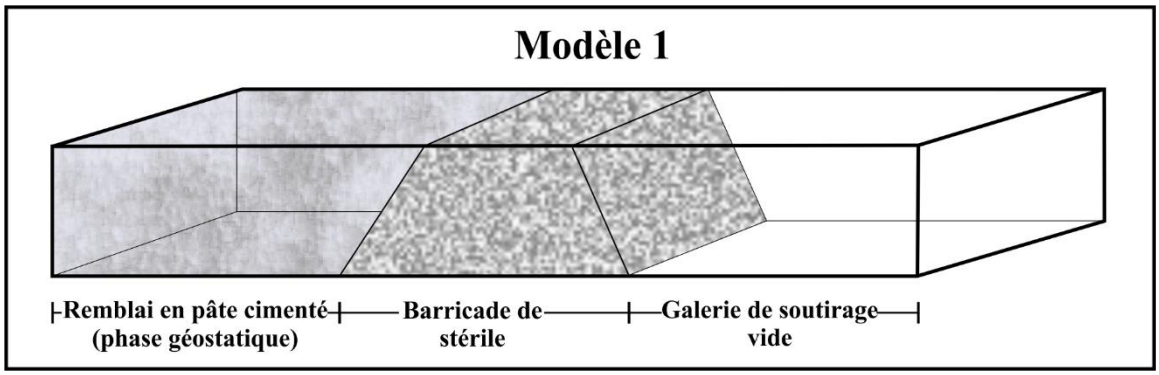


Figure 3-24: **Modèle 1** tenant compte uniquement des phénomènes ayant lieu dans la galerie de soutirage. La longueur de cette galerie sera 3 fois la longueur de la barricade.

3.4.3 Détermination des pressions à appliquer dans le modèle

Le remblai en pâte cimenté (RPC), tout comme les matériaux cimentaires utilisés en génie civil a des propriétés qui évoluent au cours du temps. Pour le RPC, différentes grandes phases permettent de subdiviser son évolution dans le temps comme le montre la Figure . Pour simplifier, on peut subdiviser l'évolution des propriétés du RPC en quatre grandes périodes :

1. Phase hydro-géostatique : phase au cours de laquelle les pressions (totales et interstitielles) sont plus ou moins égales dans les trois dimensions (x, y, z) puisque le remblai se comporte comme fluide non-Newtonien (volume isobare). Au cours de cette phase, le liant est en période de dormance pendant les 2 à 4 premières heures (dépendant du type de liant utilisé) au cours de la mise en place. C'est lors de cette phase que les pressions sur la barricade sont maximales car la totalité des pressions s'applique sur la barricade. Aussi, la très grande majorité des ruptures de barricades se produisent lors de cette phase. Il a été observé selon

les nombreuses campagnes de mesure par différents auteurs que la phase orthotrope durerait environ 10 à 15 heures depuis le début du remblayage. On peut dire que c'est la période la plus critique pour un ouvrage de retenue du remblai en pâte cimenté. C'est donc sur cette phase que se concentrera la modélisation avec FLAC^{3D}.

2. Consolidation gravitaire : après 10 à 15 heures depuis le début du remblayage, débute la phase de consolidation gravitaire (selon la distribution granulométrique des résidus du remblai et leur densité relative) en concomitance avec les phénomènes d'hydratation du liant (action mécanique + réaction chimique = durcissement progressif du remblai). La consolidation est de plus en plus importante au fur et à mesure que la hauteur de RPC augmente. C'est plus ou moins aussi durant cette phase que débute le phénomène d'effet d'arche (développement d'une résistance au cisaillement aux interfaces entre le remblai et les parois de l'encaissant rocheux). L'effet d'arche implique qu'une partie des contraintes verticales est reprise par les parois du chantier.
3. Durcissement : les phénomènes d'hydratation et de précipitation de phases cimentaires se poursuivent et l'intensité dépend de différents paramètres tel que le taux de l'agent liant, le type de liant (ciment Portland ou ajouts minéraux), le pourcentage de solides (ou la teneur en eau massique), etc. C'est au cours de cette phase que les propriétés hydro-géotechniques du RPC commencent à varier de manière plus importante. Le système se dirige vers un état d'équilibre des pressions.
4. Évolution de la résistance : au fur et à mesure que l'hydratation avance dans le temps, les pressions sur la barricade se stabilisent, voire s'annulent en ce qui concerne les pressions interstitielles. La résistance mécanique du RPC augmente et cela implique que les pressions interstitielles se sont dissipées et ne laissant que l'action des contraintes effectives (contraintes inter-granulaires).

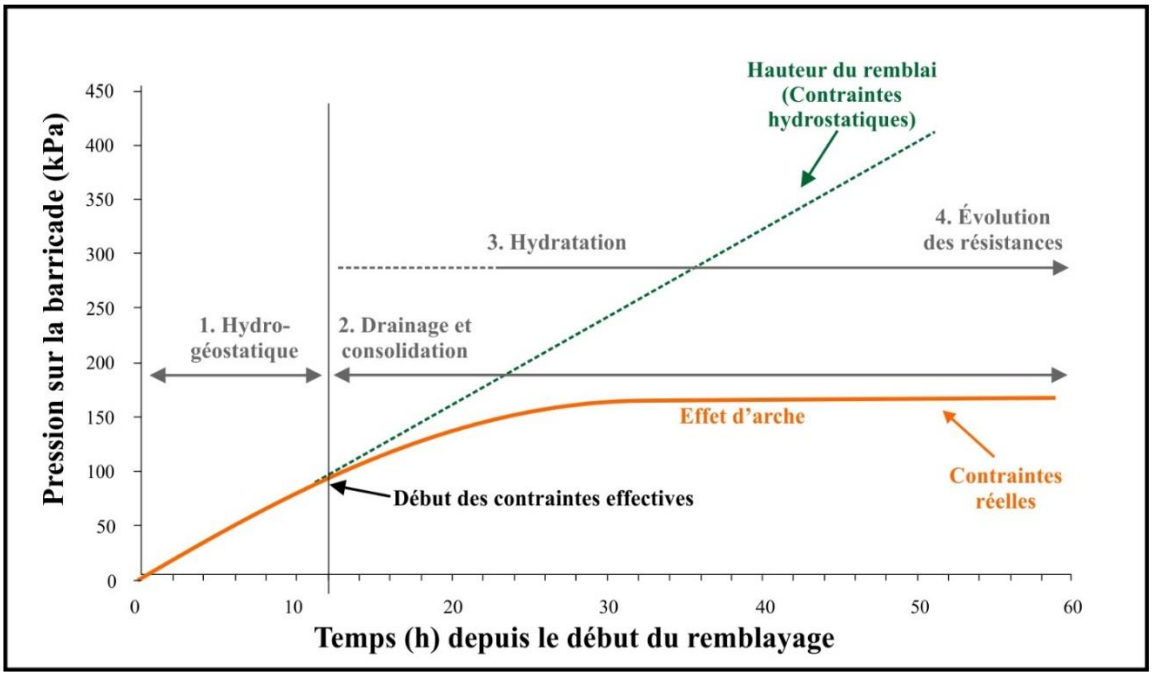


Figure 3-25: État général des pressions qui agissent sur une barricade et qui évoluent en fonction du temps.

3.4.4 Risque d'érosion absent du modèle

La stabilité d'une barricade est étroitement liée au processus complexe de la consolidation par gravité du RPC mise en place dans le chantier. L'analyse de la stabilité d'une barricade est donc complexe parce qu'on observe une variation des propriétés du RPC au cours du temps. Ce qui est plus simple dans le cas des barricades, si on les compare avec les digues en génie civil, c'est que leur dimension est nettement plus petite et que la zone de faiblesse est toujours située au même endroit, c'est-à-dire au toit. En effet, due à la méthode de construction des barricades en stériles, la zone de faiblesse se trouve toujours à l'interface barricade-toit. C'est l'endroit où la granulométrie est la plus fine, où la compaction est quasi nulle et où on retrouve souvent des vides. Ces facteurs ont pour effet que la majorité des ruptures de barricades de stériles rapportée se produisait au toit. Même s'il semblerait que de nombreuses ruptures soient causées par des phénomènes d'érosion de surverse, il n'est pas possible de simuler ce phénomène. La modélisation néglige la possibilité d'érosion. Il faut de toute façon rappeler qu'une inspection en cours de construction et un suivi du comportement de ces ouvrages est essentiel. Les bonnes pratiques de construction et de suivi sont indissociables et tout aussi importantes que le dimensionnement des barricades.

3.4.5 Caractéristiques géomécaniques du modèle

Malgré leurs caractéristiques propres, on peut néanmoins faire certains parallèles entre les barricades et les digues. Par exemple, on construit toujours une barricade en commençant près de l'épaulement pour terminer vers l'entrée d'un point de soutirage. On peut donc dire que les barricades sont construites par une pseudo-méthode en aval. En effet, comme le montre la Figure , il est impossible de reproduire la méthode en aval sous terre dans une galerie de 4,5 à 5 m de haut. L'utilisation de la « *push-plate* » lors de la construction de la barricade remanie les stériles et la faible hauteur de la galerie rend tout simplement impossible un placement en aval sous terre. La méthode en aval est utilisée pour le rehaussement des digues. Bien que ce soit la méthode la plus similaire à celle utilisée pour la construction de barricades, la méthode aval est impossible à appliquer dans un contexte souterrain.

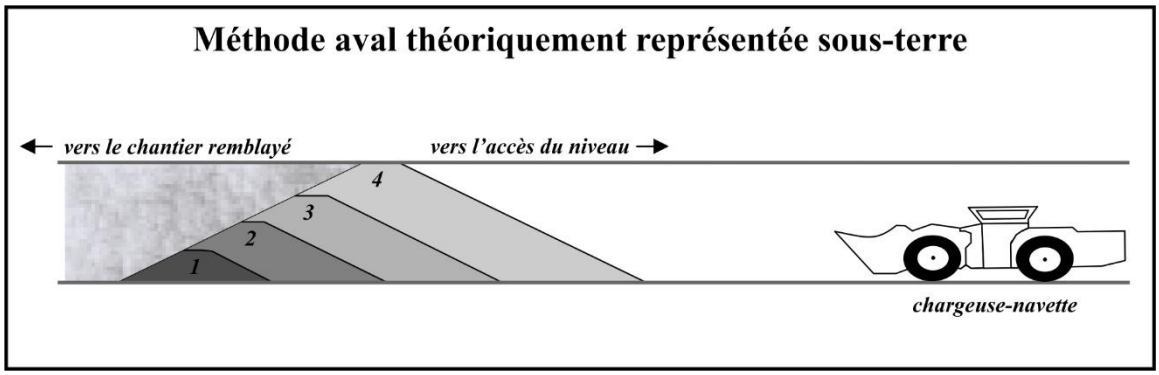


Figure 3-26: Schéma de la méthode en aval théoriquement appliquée sous terre.

Une caractéristique observée sous terre qui est aussi négligée lors de la modélisation est la migration du RPC dans la barricade de stériles. En effet, lors du havage d'une ancienne barricade en stériles déjà en place, on retrouve toujours du RPC qui a migré dans l'ouvrage. Il est facile d'imaginer que cette migration du RPC a pour effet de renforcer la solidité de la barricade. La pâte de remblai agissant un peu comme du mortier, les constituants granulaires de la barricade sont retenus par une matrice de RPC. Cette pâte vient combler les vides et l'hydratation du liant et vient améliorer la résistance au cisaillement à long terme de la barricade. Par contre, dans le scénario modélisé, nous considérons seulement les premières 12 h du remblayage, moment où le RPC n'a pas le temps de s'hydrater et où les pressions développées sont maximales. La migration de la pâte est ainsi négligée.

3.4.6 Absence de bassins de rétention dans le modèle

Un autre facteur négligé est la présence de bassins de rétention en aval des barricades. En effet, il est connu qu'une masse ajoutée en bas d'une pente vient la stabiliser en diminuant les risques de rupture planaire. Dans le cas des barricades de stériles, bien que la grande majorité des devis de construction étudiés recommande la construction d'un ou même de plusieurs bassins de rétention, cette caractéristique sera négligée ici. La raison est que d'un chantier à l'autre à l'intérieur d'une même opération, la quantité d'eau de drainage captée dans les bassins de rétention est grandement variable et les bassins se remplissent très peu dans la période étudiée, c'est-à-dire à l'intérieur des douze premières heures.

3.4.7 Cas du béton projeté en aval de la barricade

Un autre aspect qui sera difficile à modéliser est la prise en compte de la couche de béton projeté qui est placé du côté aval de la barricade de stériles. Les résistances en compression uniaxiale de ce béton sont connus et le volume total utilisé aussi. Il est possible de trouver des valeurs de résistance à la traction et de flexion. Les valeurs de résistances pourraient ainsi être choisis à partir d'échantillons pris sous terre à la mine LaRonde obtenus après une cure de 12 à 24 heures. Ce temps de cure est choisi puisque le début du remblayage se fait généralement dans les 24 heures suivant l'application de béton projeté. La géométrie du placement du béton projeté sur le côté aval de la barricade n'est jamais identique, mais le volume lui est toujours de 6 m^3. Ce volume demeure constant puisque pour des raisons de coûts, jamais plus d'un voyage de bétonnière est utilisé pour la construction d'une barricade. Les inspections ont montré qu'en général ce volume de béton est placé dans les 2/3 supérieurs de la barricade et sur une section du toit et des murs. L'ajout de béton projeté aurait pu être fait au **Modèle 1**, mais comme mentionné plus haut, la contrainte de temps n'a pas permis d'ajouter le béton. Il est pressenti que l'ajout de béton projeté sur la face aval des barricades jouera surtout un rôle de retenue des particules fines dans la partie haute de l'ouvrage plutôt que comme renforcement structural. L'ajout de béton a donc été négligé dans ce modèle.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre suit la structure du chapitre 3, mais en présentant les résultats issus des observations de tâches lors de la construction de barricades. Ensuite, les résultats issus de la prise de données géotechniques grâce aux analyses d'images sont présentés. La section suivante présente les principaux résultats obtenus grâce à la modélisation et finalement, quelques données de l'instrumentation qui ont pu être obtenus sont brièvement abordées.

4.1 Observation de tâches pour la construction de barricade

Certaines caractéristiques géotechniques ont été obtenues ou mesurées pour pouvoir augmenter la représentativité des exercices de modélisation et ainsi réussir à modéliser correctement un comportement le plus fidèlement possible. Plusieurs de ces caractéristiques ont pu être obtenues directement sous-terre alors que d'autres avaient déjà été obtenues. Ce chapitre présente les différentes propriétés géomécaniques retenues.

4.1.1 Devis de barricades de stériles à la mine LaRonde

En fonction des dimensions des chantiers, de leur emplacement, de la facilité d'accès ou d'autres particularités propres, la mine LaRonde utilise douze devis différents. Ceux-ci sont énumérés au Tableau 4-1.

Tableau 4-1: Types de barricade et description des différentes variantes répertoriées à la mine LaRonde

Type	#	Description des devis de barricade de stériles
Standard	1	Barricade standard, bouchon RPC et masse RPC
	2	Barricade standard, bouchon ½ RPC et masse en RRS ou RRC
	3	Barricade standard, bouchon RPC et 2 masses de RPC
	4	Barricade standard, stérile qui bouche le PS complet
	5	Barricade standard, chantier effondré
	6	Barricade standard, cavité, remblayé upper RPC
	7	Barricade standard cavité par niveau supérieur
	8	Barricade standard, 3 niveaux, coulés par TRP foré du haut
Double	9	Barricade double, bouchon ½ RPC et masse en RRS ou RRC
	10	Barricade double cavité par niveau supérieur
Renversée	11	Barricade renversée + standard, masse RRC, RRS ou RPC
	12	Barricade renversée, masse RRS

Les devis ont été répartis en trois groupes différents : les barricades standards simples, les barricades doubles et les barricades renversées. La Figure 4-1 et la Figure 4-2 présentent ces devis de barricades de manière graphique.

Une grande variabilité de types de barricade peut donc être construite à l'intérieur d'une même opération; ce qui veut dire qu'un seul devis standard ne peut être appliqué à toutes les situations. Le paramètre clé dans tous ces designs est la longueur au toit de la barricade. Elle peut varier dans le cas de la mine LaRonde, entre 4 m (barricade simple) et 7 m (barricade double). Ce qu'il est important de rappeler c'est que le point de départ du contact barricade/toit d'une barricade de stériles demeure toujours plus ou moins inconnu. En effet, il est impossible une fois la construction d'une barricade terminée de savoir exactement l'emplacement du contact aval barricade/toit. L'aire réelle de contact sans vide de l'interface barricade/toit demeure elle-aussi inconnue. Malgré le bon vouloir de l'opérateur qui débute sa barricade au bon endroit, au fur et à mesure que la construction se poursuit et surtout par l'utilisation de la plaque de poussée (*push plate*), le matériau en amont peut bouger. Le côté aval d'une barricade, davantage compacté et protégé par le béton projeté va garder un angle de repos plus élevé.

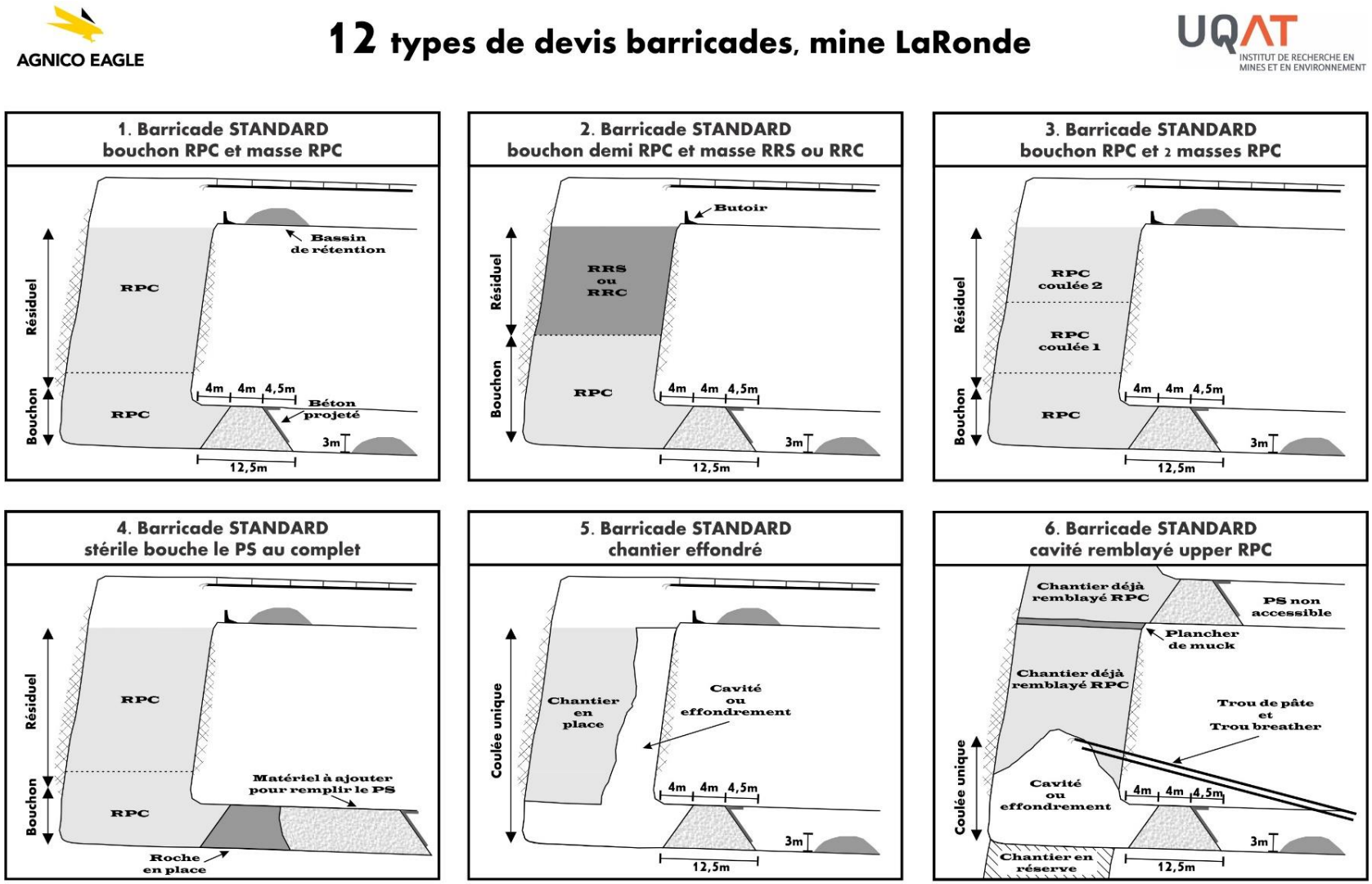


Figure 4-1: Compilation des différents devis de remblayage et de barricades simplifiés à la mine LaRonde (1 de 2).

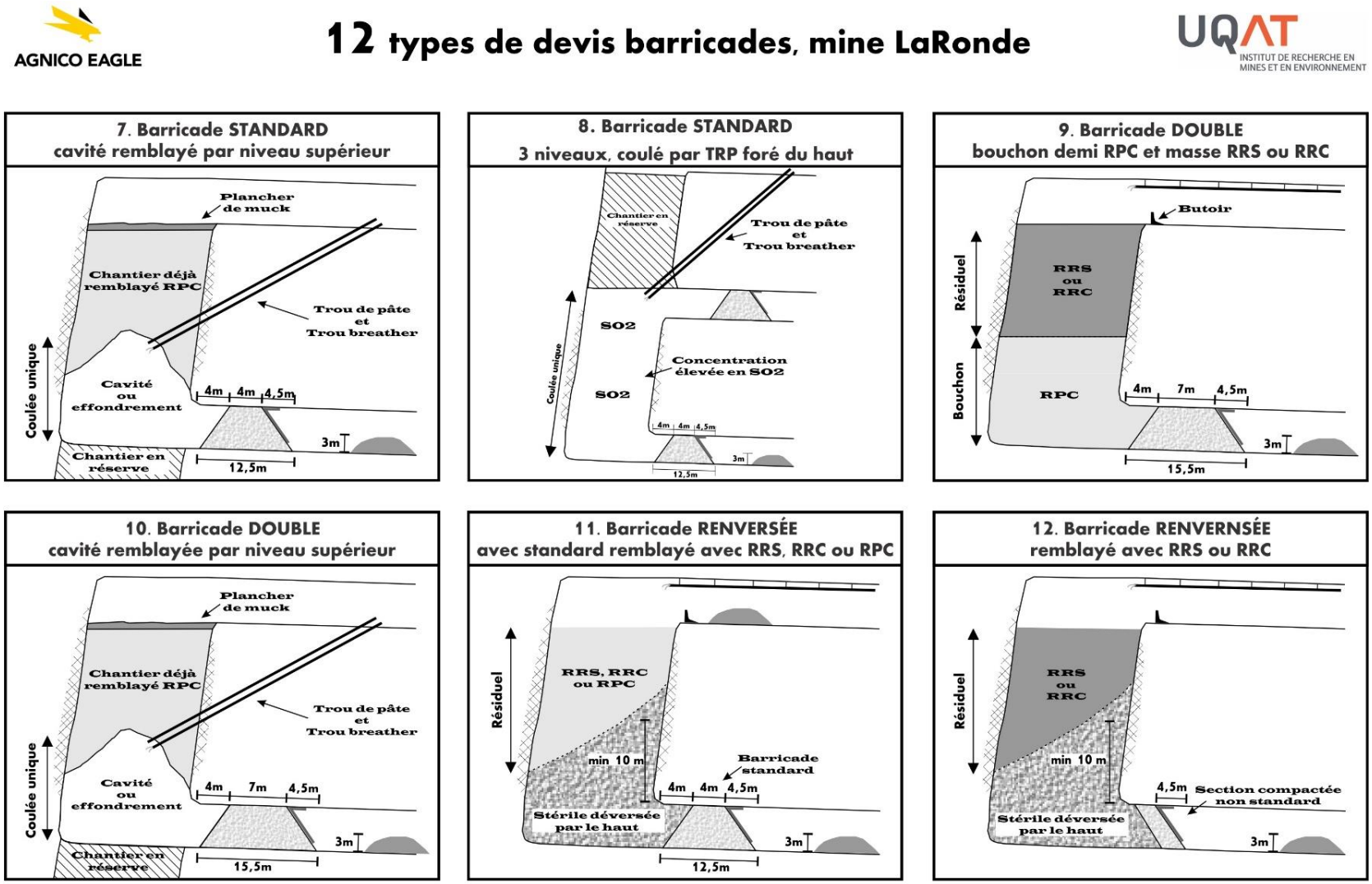


Figure 4-2: Compilation des différents devis de remblayage et de barricades simplifiés à la mine LaRonde (2 de 2).

4.1.2 Construction d’une barricade de stériles par déversement à l’aide d’une chargeuse-navette

Une fois qu’un chantier long trou est vide, c’est-à-dire une fois que le dernier godet de minerai a été sorti via la galerie de soutirage par une chargeuse-navette, l’équipe d’ingénierie prend le relais. L’ingénierie organise avec ses arpenteurs un relevé en 3 dimensions (CMS) du chantier pour valider les dimensions exactes du chantier, calculer la dilution finale et confirmer que le chantier est bel et bien vide. Avec ce relevé en main, plusieurs éléments sont prévus soit : le calcul final des quantités de RPC à couler dans le chantier, ainsi que l’emplacement et la dimension de la barricade de stériles. Un plan est émis et l’équipe du sous-terre peut commencer la construction de la barricade de stériles.

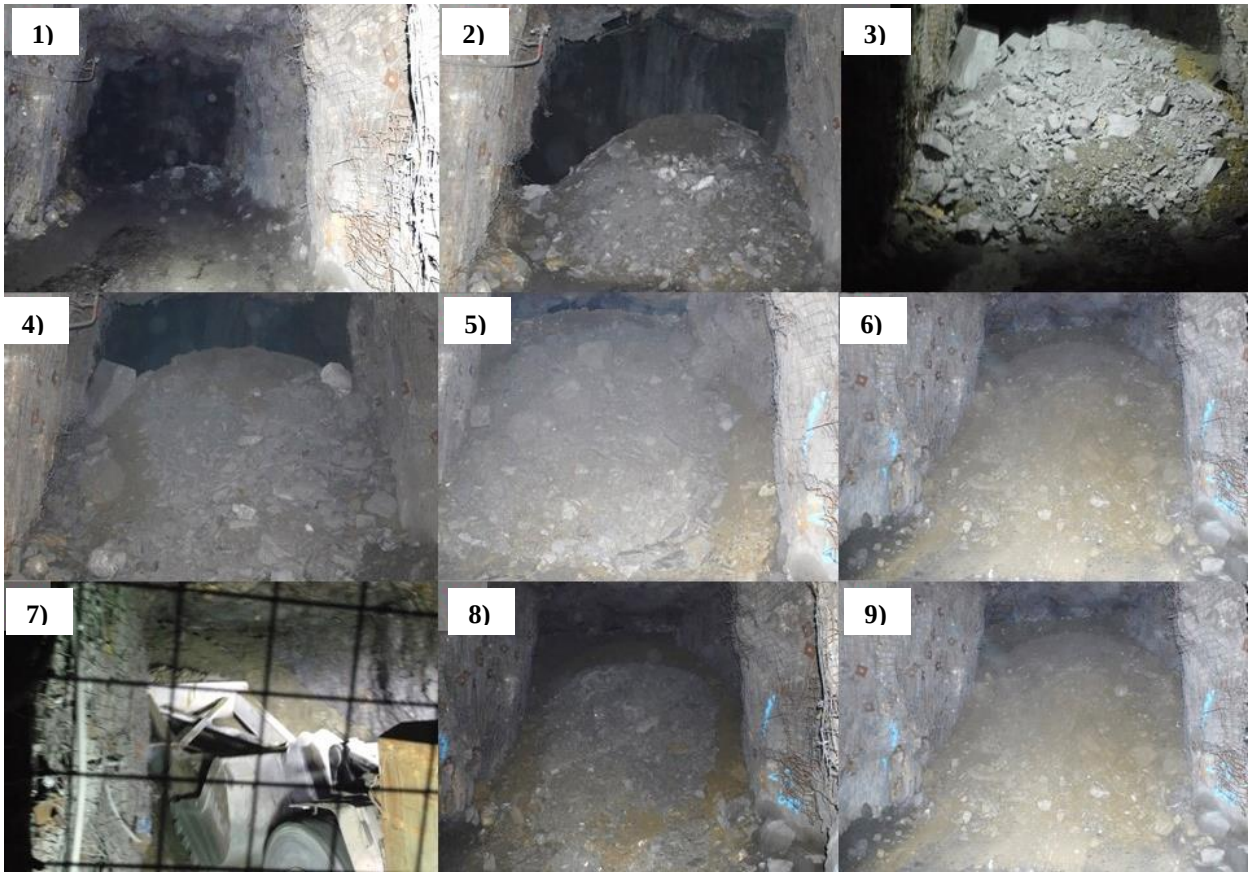


Figure 4-3: Montage de photos prises d'une barricade de stériles pendant les phases de construction à la mine LaRonde.

La Figure 4-3 montre l'avancement des travaux d'une construction en détails qui s'étale sur une période d'environ 4 à 8 heures surtout en fonction de la distance entre les stériles et l'emplacement de la barricade. L'ANNEXEs

Annexe A – Plan du chantier 262-20-35A, montre le devis de remblayage du chantier qui a été instrumenté dans le cadre de cette étude. Si on décortique plus en détails les photos présentées dans la Figure 4-3, on comprend mieux le procédé de construction d'une barricade :

1) Premier empilement de stériles qui sont amenés un godet à la fois par la chargeuse-navette. Au début, l'opérateur place le matériau de manière télécommandée. On distingue aussi la rugosité importante des murs, plancher et du toit qui vont accueillir la barricade ;
2) Les différents types de matériau utilisés et les grandes variations de granulométrie sont facilement identifiables sur cette photo ;
3) Encore une fois, une grande variation de granulométrie est visible sur cette photo ;
4) Entre l'image 3) et 4), première utilisation de la plaque de poussée; ce qui explique que l'on peut clairement voir l'apparition d'un granoclassement. À force de remonter le matériau, le plus grossier a tendance à descendre à la base de l'empilement ;
5) L'interface entre le toit et le sommet de la barricade n'est toujours pas comblé, tant qu'il y a un vide, l'opérateur doit continuer de travailler de manière télécommandée; ce qui rend le contrôle-qualité d'autant plus difficile ;
6) L'interface entre le toit et le sommet de la barricade est maintenant comblé, l'opérateur peut demeurer dans la chargeuse-navette et il devient immédiatement plus habile dans sa « compaction » ;
7) La chargeuse-navette est à l'œuvre, comme la plaque de poussée n'est pas solidement attachée au godet de la chargeuse-navette, c'est lors de la descente de la plaque de poussée que l'expérience de l'opérateur entre en ligne de compte pour ne pas que la plaque sorte du godet ;
8) Le matériau continue d'être empilé et par les couleurs différentes, on peut identifier une variation de provenance du matériau ;
9) La barricade est presque complétée, les marques bleues sur les murs représentent le repère que l'opérateur s'est tracé avec son contremaître pour marquer l'espace à remplir de stériles.

La méthode de construction avec une plaque de poussée est moins efficace que l'on pourrait imaginer. Une importante ségrégation lors des poussées fait que la granulométrie dans le haut de la barricade est nettement plus fine que la granulométrie dans le bas de la barricade. De plus, dès que les premières poussées viennent boucher l'ouverture entre le sommet de la barricade et le toit de la galerie, il est impossible de connaitre exactement la longueur du contact de stériles qui touche au toit. Comme toutes les ruptures de barricades de stériles rapportées se sont produites à l'interface barricade-roche dans la section supérieure, il m'apparait évident que c'est le point faible de l'ouvrage.

La Figure 4-4 résume de manière schématique exagérée les observations *in situ* faites sous terre. Ce que montre tout d'abord cette figure, c'est qu'il y énormément de déchets qui peuvent se retrouver dans une barricade comme les stériles non triés qui proviennent de rondes de développement qui contiennent différents matériaux. Il faut ensuite remarquer que les barricades peuvent contenir des fragments très grossiers qui favorisent la présence de vides de différentes grosseurs directement dans l'ouvrage. Le schéma permet aussi de distinguer 3 types de stériles classés en fonction de leur grosseur (fins, moyens et grossiers). Les blocs rendent d'ailleurs l'efficacité du compactage très ardu. Le bas de la barricade est le moins affecté par le remaniement du matériau lors du placement de matériau et l'utilisation de la *push-plate*. Le milieu l'est un peu plus et le haut est grandement affecté par les nombreux remaniements lors de l'action de compactage. Les observations montrent aussi que le bas de la barricade est souvent plus long que prévu et la section du haut qui est clairement en contact avec le massif rocheux apparaît de moins grandes dimensions que prévues.

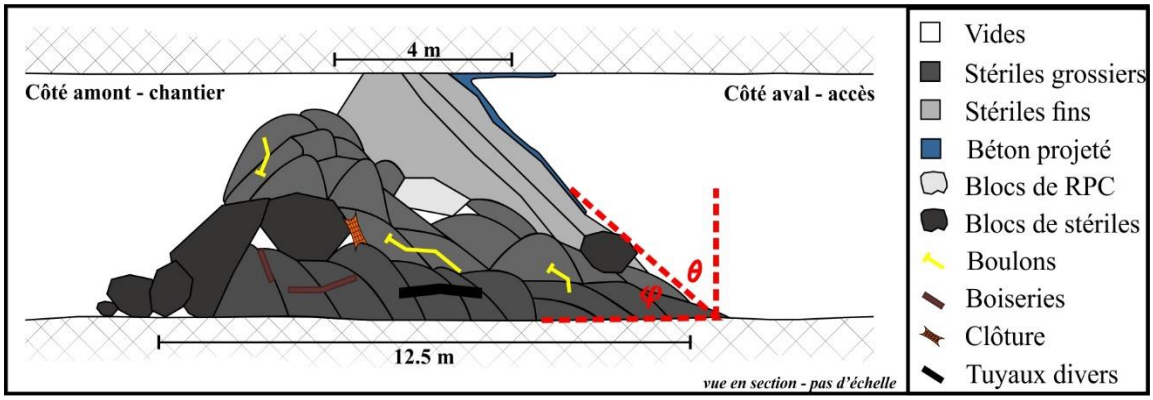


Figure 4-4: Schéma général d'une barricade de stériles, dessiné en fonction des observations de tâches sous terre.

Un autre aspect non négligeable, est l'emplacement de la construction de barricade sur un niveau. Certains emplacements sont choisis en raison de contraintes de production, à ce moment, ces emplacements sont moins adéquats. L'intérieur d'un virage entre la galerie de soutirage et la galerie d'accès est un exemple de mauvais emplacement. Une barricade construite dans un point de soutirage égale à la longueur de barricade prévu peut aussi poser problème. Ces exemples sont montrés dans la Figure 4-5. Sans que les emplacements montrés doivent obligatoirement être à éviter, l'ingénieur qui approuvera les plans de dimensionnement devra adapter la longueur des ouvrages de retenue pour tenir compte des zones où la compaction anticipée sera moindre.

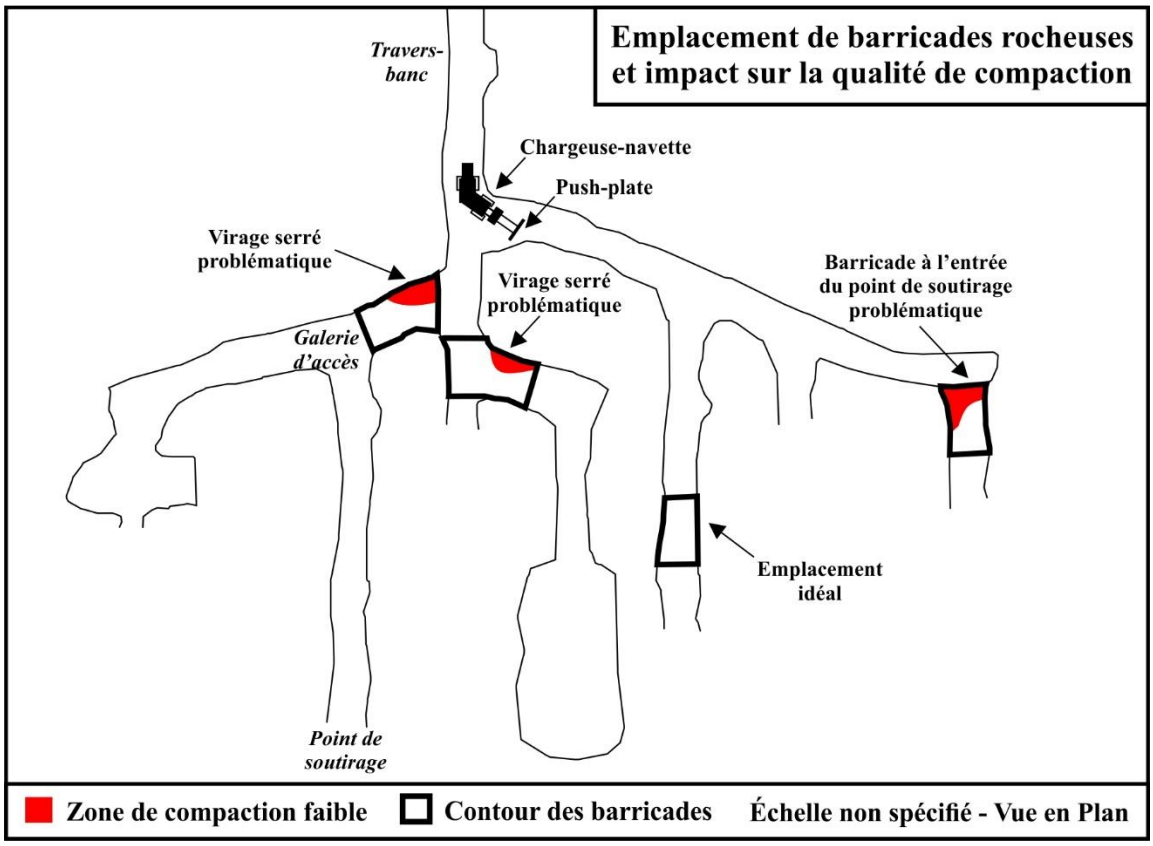


Figure 4-5: Emplacement de barricades rocheuses et impact sur la qualité de la compaction anticipée.

4.1.3 Contrôle-Qualité des barricades de stériles à la mine LaRonde

L'étude du dimensionnement des barricades de stériles rocheux construites pour retenir des colonnes de remblai en pâte frais doit être fait de manière rigoureuse. Un nombre important d'ouvrages et de chantiers importants doit être ciblé pour bien représenter la grande variabilité des matériaux, des sites de construction et des matériaux qui doivent être retenus. Une procédure de contrôle qualité passe aussi par un audit approfondi de toutes les étapes de planification, de construction et de comportements dans le temps pour permettre d'identifier les faiblesses de ces constructions.

La Figure 4-6 résume simplement en 6 étapes la construction d'une barricade de stériles et rappelle certains éléments observés lors des observations de tâche.

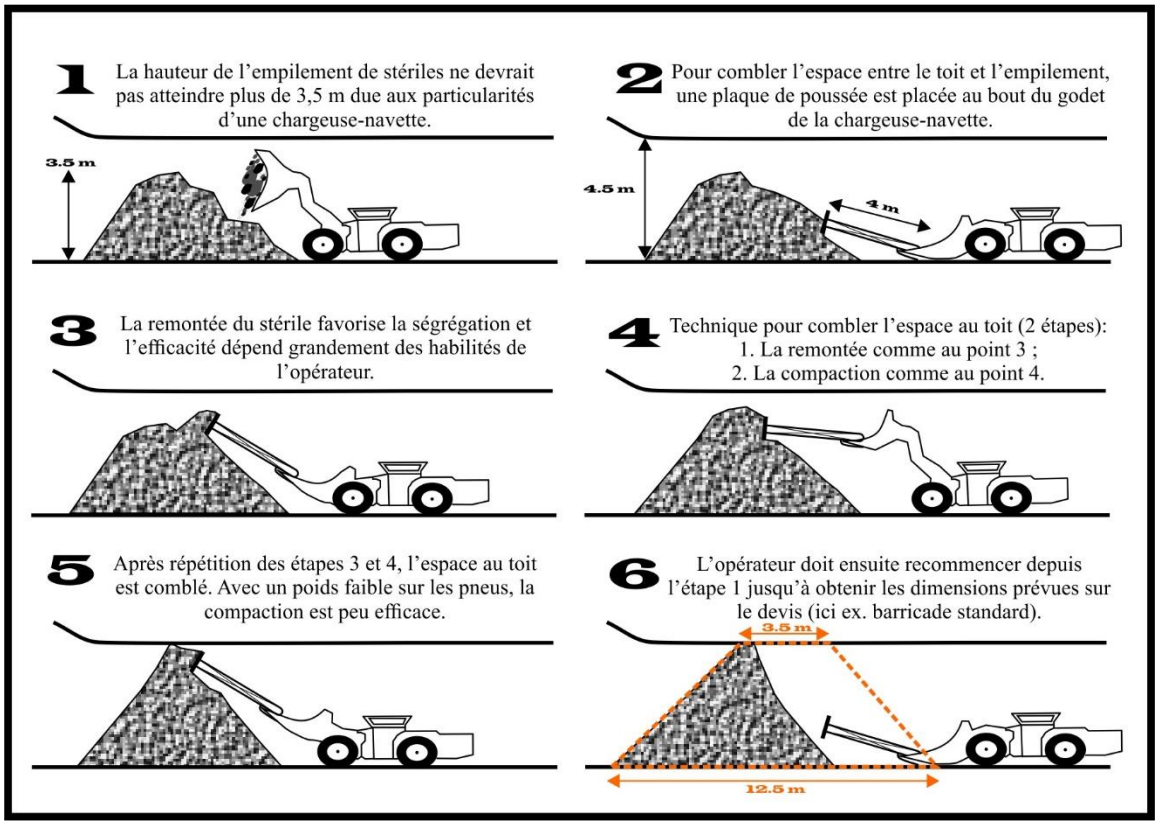


Figure 4-6: Schéma des étapes de la construction d'une barricade de stériles, vue en coupe.

1. La hauteur de l'empilement avant que la compaction n'atteigne une hauteur supérieure à l'espace entre un godet soulevé et le plancher, environ 3,5 m ;
2. Les plaques de poussée ont des longueurs variables d'une mine à l'autre, celles à la mine LaRonde ont 4 m. Il faut rappeler que ces plaques ne sont pas attachées au godet, la lame du godet s'insère dans la plaque (voir l'ANNEXE E – Plaque de poussée) permet de bien visualiser ;
3. La ségrégation de matériau est inévitable lors de la « compaction » ;
4. Un opérateur d'expérience a besoin de moins de tentatives pour remonter le matériau et boucher l'espace barricade-toit. À noter qu'aucun contrôle de la qualité de la compaction n'est effectué. Ce genre de contrôle qu'on retrouve lors de la construction de digues ;
5. Une chargeuse-navette n'a pas été conçue pour réaliser ce genre d'opération et comme le godet est vide, la majorité du poids est sur l'essieu arrière et les roues avant ont tendance à manquer de traction, plus le godet s'élève ;

6. Les opérateurs expérimentés réalisent ces ouvrages de retenue parfois deux fois plus vite que ceux qui commencent, par contre la vitesse de construction est surtout contrôlée par la proximité des stériles.

Pendant la phase "hydrostatique" du remblai, comme il n'est pas autoportant, les pressions augmentent à mesure que la colonne de remblai augmente de hauteur. À ce moment, tout type de barricade est sensible au chargement dynamique qui peut se produire suite à des événements sismiques, sautage ou chute de blocs, mais la barricade de stériles est peut-être avantagée par rapport aux autres types par sa capacité à se comprimer et à absorber des chargements dynamiques. Lorsque l'hydratation débute, le remblai en pâte ou hydraulique contenu à l'intérieur de la barricade de stériles forme un genre de conglomérat qui s'apparente à un béton de très mauvaise qualité et diminue grandement la perméabilité de l'ouvrage en évolution. Plus la coulée avance, plus les pressions horizontales du RPC poussent du côté amont de la barricade et plus la barricade doit se comprimer et se compacter. L'augmentation des pressions horizontales permet ainsi le gain de résistance de la barricade. Aucune littérature consultée ne documente la migration de RPC à travers une barricade de stériles, mais il suffit d'avoir assisté au havage d'une barricade en fin de vie utile pour voir clairement le RPC qui a migré à travers dans la barricade. Généralement, les explosifs sont même nécessaires pour réussir à haver une barricade de stériles (voir ANNEXE D - Développement à travers le RPC et ANNEXE E – Plaque de poussée). Les inspections souterraines ont montré à plusieurs reprises que le RPC s'immisce à l'intérieur des nombreux vides de ces ouvrages construits avec des fractions granulométriques très variables et peu compactées.

4.1.4 Retour sur l'observation de tâches lors de la construction des barricades de stériles

Pour caractériser les comportements géomécaniques d'un ouvrage géotechnique, une analyse complète des différents éléments qui constituent cet ouvrage doit être faite. Dans les cas des barricades de stériles, comme l'a montré la revue de littérature, peu de données sont disponibles pour décrire ses caractéristiques. Les différents devis utilisés à la mine LaRonde ont été présentés; ce qui montre déjà l'étendue et les contextes d'utilisation. Par la suite, les différentes étapes de construction de ce type d'ouvrage ont été abordées, c'est-à-dire : l'inspection de la galerie de soutirage, le placement des stériles par déversement à l'aide d'une chargeuse-navette, la compaction avec une chargeuse-navette équipée d'une plaque de poussée et finalement le placement de béton projeté. Les propriétés géomécaniques (ex. de la résistance mécanique) des

stériles et leur granulométrie ainsi que la résistance du béton projeté seront présentés dans les chapitres subséquents.

Les matériaux qui sont utilisés dans la construction de barricades de stériles rocheux sont très hétérogènes du point de vue de leurs caractéristiques géomécaniques. Comme ce matériau provient du développement fait par forage-sautage lors de la construction de rampes, de travers-bancs, d'épontes, de points de rencontres, d'infrastructures et de points de soutirage, il est juste de supposer une variabilité importante sur plusieurs aspects des matériaux de construction. Cette variabilité se situe au niveau de la minéralogie, de la distribution granulométrique, du pourcentage solide, du poids volumique, de la compressibilité, du potentiel d'oxydation, du module d'élasticité, de l'angle de friction interne, de la résistance au cisaillement etc… Toutes ces caractéristiques auront un impact sur la capacité géomécanique de l'ouvrage et le dimensionnement des devis doit tenir compte de cette grande variabilité. On comprend donc que peu importe le bon vouloir d'un auteur qui présente une formule de dimensionnement, le facteur de sécurité doit demeurer élevé pour tenir compte de la méthode de construction et des matériaux particuliers.

4.2 Mesures sur les barricades de roches stériles

Dans cette section, les différentes données géotechniques obtenus par l'auteur sont présentées ainsi qu'une analyse de données obtenus dans des rapports internes de mine LaRonde qui ont été essentielles pour les conditions limites dans le cadre de la modélisation.

4.2.1 Angle de repos des stériles

L'angle de repos des stériles à la mine LaRonde est légèrement variable. Une valeur de 36,72° côté aval comme présenté au Tableau 4-2 a été obtenue par des mesures prises sur la barricade de stériles 206-21-39, avant l'utilisation de la push-plate. Cet angle a été mesuré sur l'empilement par la moyenne de six lectures du Nord vers le Sud. La valeur proposée par Yang et al. (2014) est de 37° ce qui concorde avec les mesures de terrains.

Tableau 4-2: Angle au repos du côté aval des stériles d'une barricade, mesures prises sur la barricade 206-21-39, mine LaRonde

	Angle mesuré (°)
Point de mesure 1	36,81
Point de mesure 2	35,39
Point de mesure 3	40,35
Point de mesure 4	33,77
Point de mesure 5	34,91
Point de mesure 6	39,11
Moyenne	**36,72**

Tableau 4-3: Angle au repos du côté aval des stériles d'une barricade, mesures prise sur la barricade 266-20-133

	Angle mesuré (°)
Point de mesure 1	33,69
Point de mesure 2	40,24
Point de mesure 3	37,99
Moyenne	**37,31**

Une autre vérification a été faite à la barricade du chantier 266-20-133 avec un résultat encore plus proche des valeurs proposées par Yang et al. (2014) comme montré au Tableau 4-3. Cette fois la valeur obtenue est de 37,31°.

Une fois le stérile compacté et le béton projeté appliqué, l'angle est relativement différent. Des mesures effectuées à la barricade du chantier 293-20-122 par un technicien de la mine ont permis de déterminer un angle de 47,26°. La valeur proposée par (Yang et al., 2014) est de 50° ce qui est supérieur aux dizaines de valeurs prises sous terre à la mine LaRonde.

Si la valeur de l'angle au repos avant compaction est comparée avec celle après compaction, on obtient un écart d'environ 10°. Cet écart permet de calculer deux triangles hypothétiques avant et après compaction pour ensuite calculer un degré de compaction d'environ 65% de la section triangulaire en aval de la barricade.

Ce qui est assez intéressant, c'est l'interprétation d'un CMS qui a été effectué après la construction d'une barricade de stériles dans un chantier vide, comme montré sur la Figure 4-7.

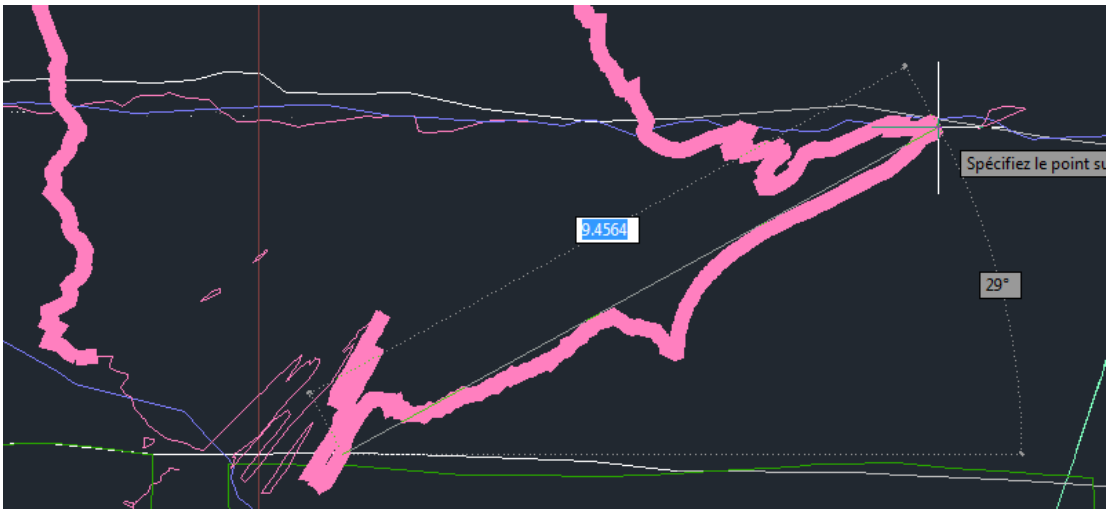


Figure 4-7: Capture d'écran prise dans le logiciel AutoCad qui montre l'angle réel de la barricade de stériles en amont, le contour en mauve pâle (trait épais) représente le contour du CMS, tirée du chantier 59-20-29.

Le contour en mauve pâle (trait épais sur la figure) représente le signal traité du CMS; on voit ensuite grâce au logiciel AutoCad que l'angle de repos est nettement plus faible en amont qu'en aval (non visible sur cette figure) avec une valeur moyenne d'environ 30 degrés. Il est aussi possible de remarquer la présence de gros blocs et de trous qui sont de fidèles témoins de l'hétérogénéité de ce type d'ouvrage.

4.2.2 Compilation du tonnage des barricades de stériles à la mine LaRonde

En compilant l'information contenue dans les rapports des superviseurs en construction de la mine LaRonde, certaines statistiques ont pu être produites. Le Tableau 4-4 et le Tableau 4-5 présentent les résultats de ces compilations. À noter que seulement les barricades dont les rapports de construction ne présentaient aucune incertitude de tonnage ont été considérées.

Tableau 4-4: Compilation des tonnages des barricades simples de stériles construites à la mine LaRonde entre le 1er janvier 2012 et août 2015

Barricade simple (en tonne métrique)	
Nombre de barricades répertoriées	171
Minimum en tonnes	224
Maximum en tonnes	700
Moyenne en tonnes (total)	470,49
Moyenne de nombre de godets de 8 verges (total)	59
Moyenne en tonnes (haut de mine)	458,70
Moyenne en tonnes (bas de mine)	496,74

Tableau 4-5: Compilation des tonnages des barricades doubles de stériles construites à la mine LaRonde entre le 1er janvier 2012 et août 2015

Barricade double (en tonne métrique)	
Nombre de barricades répertoriées	27
Minimum en tonnes	702
Maximum en tonnes	1194
Moyenne en tonnes (total)	877,85
Moyenne de nombre de godets de 8 verges (total)	110
Moyenne en tonnes (haut de mine)	875,27
Moyenne en tonnes (bas de mine)	881,08

Pour les barricades simples standards, sur les 171 barricades répertoriées entre janvier 2012 et août 2015, une grande variabilité de tonnage a été observée. Cette variabilité pourrait être expliquée par des erreurs de comptage de chargement ou tout simplement parce que les barricades sont en général surdimensionnées par rapport aux devis pour permettre d'entreposer davantage de stériles. En général, comme le stérile dans les années étudiées est plus abondant dans le secteur du bas de mine que dans le haut, les barricades sont en moyenne plus grosses dans le bas de la mine. En moyenne, une barricade simple à la mine LaRonde est composée de 59 godets de 8 verges de stériles pour une moyenne de 470,49 tonnes.

Pour les barricades doubles standards, construites moins fréquemment, un total de 27 a été répertorié entre janvier 2012 et août 2015. Il y a encore une fois une grande variabilité de tonnage entre les plus petites et les plus grosses barricades et cela pourrait être expliqué par des raisons

similaires que celles abordées plus haut pour les barricades simples. Peu de différence est parfois observable entre le tonnage des barricades construites dans le haut ou le bas de la mine. En général, lors de la construction de barricades doubles, les contremaitres sont davantage sensibilisés à l'importance du respect des devis et c'est pourquoi le suivi est meilleur et les résultats aussi.

4.2.3 Résistance en compression uniaxiale du stérile de LaRonde

Conformément au programme de contrôle de terrain de la mine LaRonde, pour chaque unité géologique au caractère distinct, 5 échantillons de roche sont pris et caractérisés. Le but de ces tests est de déterminer les propriétés géomécaniques des différentes unités en compression uniaxiale (UCS), avec le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν) (Giroux, 2015). Les différents résultats sont présentés au Tableau 4-6.

Tableau 4-6: Propriétés géomécaniques des roches typiques de la mine LaRonde (Giroux, 2015)

	Type de roche	σ_c (MPa)	**E** (GPa)	**ν** (mm/mm)
Surface jusqu'au niveau 245	Andésite (V6)	60	20	0,3
	Dacite-rhyodacite (V4)	40	20	0,3
	Rhyolite calco-alcaline	40	20	0,3
	Andésite basaltique (V6-V7)	60	10	0,3
	Tuff intermédiaire (V9i)	140	48	0,16
	Sulfure massif (SZM)	100	53	0,28
	Sulfure semi-massif (SZ)	85	47	0,16
	Tuff felsique zone de sulfures (V9aSZ)	140	58	0,15
	Tuff à lapillis (V9aLP)	150	47	0,13
	Basalte (V7)	95	49	0,14
Niveau 290	Rhyolite	260	67	0,29
	Rhyodacite (V9i)	192	60	0,28
	Sulfure massif (SZM)	193	70	0,32
	Tuff felsique (V9a)	253	66	0,27

4.2.4 Résistance en compression simple du béton projeté

Béton Fournier a effectué des tests lors de l'été 2014 sur le béton projeté utilisé sous terre à la mine LaRonde. Des échantillons ont été pris dans le réservoir d'une bétonnière sous terre (C14-008) et à la sortie de la buse de béton projeté (C14-008C) après l'ajout d'accélérant (Sureshot). Les retardants sont ajoutés au béton projeté pour permettre le transport sous terre et faciliter la mise en place. Les résultats obtenus du carottage du béton projeté sont contenus dans le rapport interne de

Sylvestre (2014). Ce qui est facilement appréciable dans le Tableau 4-7 c'est une perte de résistance importante du même béton à la suite d'un ajout d'accélérateur. Lors de l'application de béton projeté, l'opérateur peut ajuster la quantité d'accélérant qui permet au béton de rapidement curer ou figer sur une paroi verticale ou inclinée sans qu'il s'écoule. Les observations de tâches sous terre ont permis d'estimer une utilisation importante d'accélérateur jusqu'à 400 litres par bétonnière de 6 m^3.

D'autres observations du même type ont déjà été faite par Brenchley (2010) qui évalue que la quantité d'accélérateur peut grandement varier d'un opérateur à l'autre en fonction de son expérience et de l'état général de la pompe à béton.

Tableau 4-7: Résistance UCS des échantillons carottés de béton projeté avant et après une projection sous terre sur une planche de bois (Sylvestre, 2014)

N° d'échantillon	**C14-008**	**C14-008C**
Ouvrage bétonné	Béton projeté	Béton projeté
Accélérant	Non	Oui
Cure de 24 heures	10	13
Cure de 48 heures	-	14,9
Cure de 72 heures	-	22,3
Cure de 7 jours	42	16,8
Cure de 28 jours	54	27,9
Cure de 28 jours	53	29,7

Comme le montre la Figure 4-8, l'utilisation de grande quantité d'accélérateur a pour effet de diminuer de manière importante la résistance mécanique uniaxiale du béton projeté. L'auteure, Sylvestre (2014), mentionne aussi que les strates étaient le point de faiblesse et l'endroit où les échantillons cèdent lors des essais de compression. L'utilisation de béton projeté sur le côté aval des barricades de stériles à la mine LaRonde fait partie intégrante des devis et est probablement très importante dans la résistance globale de ces ouvrages. C'est pourquoi le suivi de résistance du béton projeté doit être fait par toutes les opérations qui utilisent le béton projeté dans la construction de barricades.

Figure 4-8: Carottes de béton projeté avec strates de faiblesse causées par l'ajout excessif d'accélérant (Sylvestre, 2014).

Il faut rappeler que la résistance en compression du béton projeté peut être contrôlée par une fracture dans la roche elle-même, par une faiblesse dans la coquille de béton ou par une rupture de cisaillement à l'interface béton projeté/interface rocheuse (Windsor et Thompson, 1999). Un ajout excessif d'accélérateur rajoute de nouveaux plans de faiblesses potentielles en diminuant l'épaisseur réelle de la coquille de béton projeté.

4.2.5 Résultats et discussion de l'analyse granulométrique par WipFrag

Seules les barricades des chantiers 191-21-53 et 266-20-131B ont été retenues pour l'analyse à l'aide du logiciel WipFrag. Comme il y avait certains ajustements à faire sur la procédure de prise de photos, plusieurs analyses ont été rejetées, car non représentatives. Les résultats généraux sont présentés au Tableau 4-8. Ce qui est intéressant c'est qu'il est possible d'apprécier l'impact de la ségrégation des matériaux stériles lors de la procédure de compaction à l'aide de la *push-plate*. En effet, le diamètre moyen (D_{50}) de la barricade 191-21-53 a été déterminé durant la construction et il est de 5,79 mm; ce qui représente une grosseur de stérile moyen. L'échantillonnage du diamètre moyen (D_{50}) de la barricade 266-20-131B est de 9,17 mm puisqu'il a été fait après la construction. La plaque de poussée remanie les stériles lors de la compaction et force une ségrégation granulométrique qui a pour résultat de laisser les fines plus facilement compactables dans le haut de la barricade et les grossières qui tombent par gravité au bas de l'empilement. Les données obtenues par WipFrag ne font que confirmer les observations de tâches effectuées lors de la construction. Tous les diamètres mesurés sur chacune de ces deux barricades permettent d'obtenir les mêmes résultats.

Tableau 4-8: Résultats généraux des analyses granulométriques des barricades 191-21-53 et 266-20-131B obtenus par WipFrag

Barricades	**191-21-53**	**266-20-131B**
Emplacement	Centre inférieur	Centre inférieur
Moment	Durant la construction, avant l'utilisation de la *push plate*	24 h après la construction, avant l'application du *shotcrete*
% de photo utilisé	100 %	66 %
D_{10} (mm)	1,96	3,12
D_{25} (mm)	3,23	5,33
D_{50} (mm)	5,79	9,17
D_{75} (mm)	9,55	15,95
Minimum (mm)	0,19	0,30
Maximum (mm)	23,11	33,53
Moyenne (mm)	1,55	2,67
Nombre de particules	8 093	5 016

4.2.6 Paramètres de description granulométrique

La taille et la distribution granulométrique ont un impact sur les propriétés géomécaniques d'un ouvrage géotechnique. La présence de particules fines permet une meilleure compaction, mais diminue la conductivité hydraulique tandis que les particules grossières sont plus difficiles à compacter tout en augmentant la conductivité hydraulique. Une granulométrie optimale doit permettre de réduire le gradient hydraulique et les pressions interstitielles; ce qui va augmenter la stabilité (Aubertin et al., 2015). Pour mieux caractériser une distribution granulométrique, deux coefficients sont largement utilisés, il s'agit du coefficient d'uniformité (C_U) et du coefficient de courbure (C_C). Le coefficient d'uniformité exprime l'étalement de la courbe granulométrique et il varie généralement entre 1 et 200, quoique qu'il puisse dépasser 1000 :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad [4\text{-}1]$$

D_{60} = Diamètre effectif des particules qui correspondent à 60% du passant

D_{10} = Diamètre effectif des particules qui correspondent à 10% du passant

Plus le coefficient d'uniformité a une valeur basse, plus l'écart entre le D_{60} et D_{10} est faible; ce qui indique une granulométrie serrée. Dans le cas inverse où la différence entre le D_{60} et le D_{10} est

grande, plus la valeur du C_U sera élevée indiquant une granulométrie étalée. Le Tableau 4-9 exprime de manière approximative l'étalement de la granulométrie en fonction de la valeur du coefficient d'uniformité (Hassani et Archibald, 1998). Les matériaux ayant une distribution granulométrique très étalée (avec C_U élevé) auront une densité plus élevée comme les grains ont un nombre plus important de points de contact. Ainsi, les pressions sont distribuées de manière plus efficace; ce qui amènera une résistance au cisaillement plus élevée si on compare avec un matériau similaire, mais ayant un C_U plus bas (Linero et al., 2007; Xiao et al., 2015). Le bri de particules dans les échantillons présentant un coefficient d'uniformité élevé est généralement plus bas que les échantillons ayant un bas coefficient d'uniformité (Lee et al., 2009).

Tableau 4-9: Description de la granulométrie en fonction de différentes valeurs de coefficient d'uniformité (cf. Hassani et Archibald, 1998).

Coefficient d'uniformité	**Descriptif**
$Cu \leq 2$	Granulométrie très uniforme
$2 < Cu \leq 5$	Granulométrie uniforme
$5 < Cu \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 < Cu \leq 200$	Granulométrie étalée
$200 < Cu$	Granulométrie très étalée

En ce qui concerne le coefficient de courbure, il décrit la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres effectifs de D_{10} et D_{60} grâce à l'équation [4-2].

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} * D_{10})} \qquad [4\text{-}2]$$

D_{60} = Diamètre effectif des particules qui correspondent à 60% du passant
D_{30} = Diamètre effectif des particules qui correspondent à 30% du passant
D_{10} = Diamètre effectif des particules qui correspondent à 10% du passant

Un coefficient de courbure trop élevé ou trop bas indique qu'il y a un manque de particules grossières ou fines, l'une par rapport à l'autre; ce qui représente une granulométrie mal classée.

Une granulométrie mal classée implique que toutes les dimensions de grains ne sont pas représentées et donc qu'une certaine classe prédomine. Comme le montre le Tableau 4-10, le calcul des coefficients de courbure et d'uniformité de deux barricades permet de dire qu'en général, les stériles utilisés sont semi-étalés.

Tableau 4-10: Calcul des coefficients d'uniformité et du coefficient de courbure des stériles

	191-21-53	**266-20-131B**
D_{10} (mm)	1,96	3,12
D_{30} (mm)	4,24	5,51
D_{60} (mm)	6,85	13,65
Cu	3,49	4,38
Descriptif Cu	Semi-étalé	Semi-étalé
Cc	3,68	2,88
Descriptif Cc	Bien-étalé	Bien-étalé

4.2.7 Propriétés géomécaniques des stériles

De nombreuses informations pertinentes contenues dans le programme de contrôle de terrain de la mine LaRonde (Giroux, 2015) ont permis la mise au point de différents tableaux. Le Tableau 4-11 présente différentes valeurs de résistance en compression, de module de Young et du coefficient de Poisson en fonction des lithologies retrouvées à la mine LaRonde. Les sulfures massifs et semi-massifs, qui sont généralement du minerai, ne seront pas considérés comme lithologie encaissante. Les différents tufs, roches sédimentaires volcaniques, sont aussi mis de côté. La raison étant qu'il est plus facile de représenter des lithologies volcaniques massives qui sont plus isotropes (andésite, dacite-rhyodacite, andésite basaltique et basalte). En tenant compte des lithologies choisies, une moyenne a été faite qui est représentative des différents types de stériles de la mine LaRonde.

Tableau 4-11: Propriétés des différents stériles de la mine LaRonde et moyenne de ces propriétés, utilisée lors de la simulation (chapitre 3).

Type de roche	**σ_c (Pa)**	**E (GPa)**	**ν (mm/mm)**
Andésite (V6)	60	20	0,3
Dacite-rhyodacite (V4)	40	20	0,3
Rhyolite calco-alcaline	40	20	0,3
Andésite basaltique (V6-V7)	60	10	0,3
Tuff intermédiaire (V9i)	140	48	0,16
Sulfure massif (SZM)	100	53	0,28
Sulfure semi-massif (SZ)	85	47	0,16
Tuff felsique zone de sulfures (V9aSZ)	140	58	0,15
Tuff à lapillis (V9aLP)	150	47	0,13
Basalte (V7)	95	49	0,14
Tuff felsique (V9a)	253	66	0,27
Moyenne des lithologies considérées	**105,73**	**39,82**	**0,23**

Suivant la même logique énoncée plus haut pour le choix des lithologies à considérer dans la modélisation (chapitre 3), les valeurs de classification géotechniques GSI et RMR ont été rassemblées dans le Tableau 4-12. Seules les valeurs du basalte et de l'andésite ont été considérées pour l'établissement d'une moyenne qui sera utilisée pour le calcul du module de Young des stériles qui composent les barricades.

Tableau 4-12: Propriétés des différents stériles de la mine LaRonde et ceux qui seront considérées dans la modélisation (chapitre 35)

Type de roche	**GSI**	**RMR**
Basalte (V7)	85	82
Andésite (V6)	71	82
Tuff intermédiaire (V9i)	50	82
Tuff intermédiaire altérée (V9i)	35	32
Sulfure massif (SZM)	50	65
Sulfure semi-massif (SZ)	35	65
Tuff à lapillis (V9aLP)	50	82
Moyenne des lithologies considérées	**78**	**82**

Il est possible de se trouver dans différentes mines et à différentes profondeurs, les contraintes verticales et horizontales vont donc varier. En tenant compte des valeurs disponibles dans le programme de contrôle de terrain, il est possible de supposer que la barricade se trouve dans différents niveaux de la mine LaRonde. Toutes les valeurs répertoriées sont contenues dans le Tableau 4-13. Par contre, pour la modélisation, il est supposé que les contraintes locales ne puissent avoir un impact sur la stabilité d'une barricade dans les heures suivant sa construction. La convergence de la galerie n'est pas suffisante pour avoir un impact sur le confinement de l'ouvrage de retenue.

Tableau 4-13: Contraintes verticales et horizontales en fonction de l'élévation, mine LaRonde

Emplacement	**Élévation par rapport à la surface (m)**	**Contrainte verticale (MPa)**	**Contraintes horizontales (MPa)**	
Bouquet 2 - Dumagami	190	7.4	19.1	14.4
Puits #1 (21ième niveau)	900	24	54.5	36.3
Puits #3 (niveau 146)	1460	42	65	55
Puits #3 (niveau 220, McKinnon 2004)	2200	59	72	59
Puits #3 (niveau 215, Corthesy 2006)	**2150**	**52**	**81**	**45**

Dans Hoek (2009), le module de déformation (module de Young) peut être obtenu par la relation suivante :

$$E(GPa) = \left(\frac{1 - 0,5 * D}{1 + \exp\left(\frac{75 + 25 * D - GSI}{11} \right)} \right) \qquad [4\text{-}3]$$

Où D est le paramètre de dislocation ou degré de perturbation du massif. Pour les massifs intensément fracturés assimilables aux sols granulaires, le D est égal à zéro (Hoek, Carranza-Torres et Corkum, 2002). C'est cette valeur qui se rapproche le plus des caractéristiques des barricades de stériles rocheux. Le GSI choisi est de 78, il faut se rapporter au Tableau 4-12.

$$E(GPa) = \left(\frac{1 - 0,5*0}{1 + \exp\left(\frac{75 + 25*0 - 78}{11} \right)} \right)$$

$$E(GPa) = \left(\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-3}{11} \right)} \right)$$

$$E(GPa) = \left(\frac{1}{1.761300387} \right) \simeq 0.57$$

Ainsi, suivant ce développement le module de Young utilisé est de 0,57 GPa.

Pour le coefficient de poisson ν, la valeur de 0,334 a été retenue. Cette valeur a précédemment été utilisée pour les analyses de stabilité des talus de digue avec des matériaux granulaires similaires aux barricades (Ormann et al., 2013). La valeur de masse volumique choisie est celle employée par Agnico Eagle pour différents calculs avec les stériles en général lors de différents calculs, elle est de 18,1 kN/m³.

4.2.8 Propriétés du remblai en pâte à la mine LaRonde

Pour ce qui est des propriétés du remblai en pâte, des valeurs plutôt génériques ont été répertoriées dans le Tableau 4-14. Les valeurs choisies pour les propriétés mécaniques du RPC sont d'ailleurs les mêmes qu'ont choisies (Li et Aubertin, 2009a, 2009b, 2009c).

Tableau 4-14: Propriétés du remblai en pâte cimenté utilisées pour la modélisation (chapitre 3)

Propriétés du RPC	Valeurs
Porosité (n)	45 - 50 %
Poids volumique (γ) LaRonde	21,5 kN/m^3
Poids volumique (γ) Westwood	18,8 kN/m^3
Poids volumique (γ) Goldex	18,8 kN/m^3
Poids volumique (γ) Casa Berardi	19,9 kN/m^3
Cohésion (c)	0
Angle de friction interne (ϕ)	42 - 45°
Module de Young (E)	300 MPa
Coeffcient de Poisson (ν)	0,2

4.2.9 Retour sur la détermination des propriétés géomécaniques des barricades de stériles de la mine LaRonde

La résistance individuelle des particules a aussi un effet sur la résistance au cisaillement et la compressibilité des matériaux. Aucun test n'a été effectué pour estimer la résistance des particules comme des tests en compression, des tests de résistance par abrasion ou d'impact. Aucun test n'a aussi été effectué pour déterminer la masse volumique des solides qui constituent une barricade de stériles. Les données disponibles étaient assez précises et variées dans le document interne de Giroux (2015)

En ce qui concerne les fractions granulométriques utilisées pour la construction de barricade de stériles, elles seront variables d'une mine à l'autre puisque le stérile provient de rondes de développements qui fragmentent différemment la roche d'une opération à l'autre. La granulométrie va même changer à l'intérieur de la même opération pour deux raisons principales. Dans une mine souterraine, plusieurs lithologies géologiques différentes constituent le stérile et ces lithologies vont donner des granulométries post-sautage différentes. La deuxième raison, c'est que puisque le stérile peut être chargé et déposé à multiples reprises avant d'être utilisé dans une barricade (récupération de stériles, transport d'un niveau à l'autre, chute à stériles…), sa fragmentation et sa ségrégation va se poursuivre dans le temps et diminuer sa granulométrie.

Les analyses par images sont très peu dispendieuses et peuvent même être fait à la pièce via le service WipWare disponible en ligne. Il est recommandé pour toutes les opérations de faire une campagne de prise de données granulométriques qui seront très utiles par la suite dans le dimensionnement des ouvrages de retenue de remblai dans un contexte souterrain.

4.3 Présentation des résultats pour les tests in-situ de pressions

La prise de mesure *in situ* est rarement parfaitement réussi sans encombre, la revue de littérature a permis de montrer que de nombreux projets ont dû faire face à des problématiques variés. Chute de blocs, équipements non fonctionnels, équipements brisés lors du transport ou lors de l'installation, données effacés ou erronés. Le fait que tous les instruments sont placés dans un chantier et qu'ils ne peuvent être récupérés par la suite ne permet pas de deuxième chance. Le Tableau 4-15, le Tableau 4-16 et la Figure 4-9 montre l'étendue des difficultés rencontrés lors de l'échantillonnage *in situ* de ce projet. Même si le chantier devait finalement commencer son remblayage la première semaine de juin 2016, il a été retardé au samedi. Ensuite, même si

l'instrumentation était prête et que le remblayage devait commencer le samedi 4 juin, un retard de 2 566 minutes (environ 42 heures) a finalement retardé le début de la coulée du bouchon au 6 juin. Un chantier non remblayé est plus sensible aux mouvements de terrain et aux secousses sismiques et comme le chantier instrumenté, situé à 2,6 km est difficilement accessible, les instruments ne pouvaient être sortis du chantier. La mine LaRonde de par sa profondeur et son étendu concentre l'air climatisé dans les secteurs où le personnel minier travaille et les chantiers lorsque vidés bénéficie moins d'un apport d'air frais. L'environnement du chantier 262-20-35A était donc extrêmement humide, avec énormément de poussière et les températures ambiantes étaient au-dessus de 30 degrés Celsius. Ces conditions sont à peu près les pires que peuvent endurer des instruments de mesures. Dès que le RPC vient entourer les instruments, l'environnement devient beaucoup plus adapté, mais le temps d'attente est crucial. La longue attente de deux jours a eu pour effet que la cage la plus profonde, la plus près de la barricade a été complètement écrasé par des chutes de blocs et aucune donnée n'ont pu être enregistrée. La cage la plus près de la galerie de forage, la plus haute dans le chantier a été elle-aussi très sévèrement frappé par les chutes de blocs, il faut dire que l'attente, les fuites, les bris et les maintenances ont fait qu'il a fallu attendre 9 jours avant que cette cage soit protégée par le RPC. Les piézomètres et les cellules Decagon pourtant testés au préalable ont aussi seulement rapportés des données erronées qui ont dû être ignorées.

L'usine de remblai de la mine LaRonde n'est pas reconnu pour avoir de problèmes de fiabilité, ni son réseau qui est au contraire en général très fiable. La raison exacte qui explique que sur une période de 14 jours, 24 % du temps (voir Figure 4-9) seulement a été attribué au remblayage et qu'il a fallu 19 936 minutes (plus de 14 jours) pour remblayer un chantier demeure une pure malchance. Bien que j'aie passé de nombreuses journées directement sur le site de la mine LaRonde dans le cadre de ma maitrise, les délais prolongés pour réaliser les essais ont fait que je n'étais pas présent sur le site pour descendre sous terre et faire un suivi serré du projet de remblayage du 262-20-35A. J'ai par contre eu la chance d'installer les instruments et les cages et j'ai formé le responsable du remblai sur le site, Vincent Dagenais, pour la prise de données. Vincent s'est aussi chargé par la suite de me transmettre les données recueillies. Ce travail rappelle l'importance de faire une inspection quotidienne sous-terre pour prendre les données, vérifier que tout est branché et faire un suivi avec l'équipe du sous-terre pour rappeler l'importance de ces essais pour limiter au maximum les attentes et les temps mort sans remblayage.

Tableau 4-15: Événements en fonction de la date et heure et quantité d'eau pour le nettoyage

		Date et heure	Minutes relative	Temps écoulé	Nettoyage
Attente	Début	2016-06-04 - 14:45	0	2 566	
	Fin	2016-06-06 - 09:30	2566		
Coulée 1	Début	2016-06-06 - 09:31	2567	84	89 000 litres d'eau
	Fin	2016-06-06 - 10:55	2651		
Fuites niveau 86 et 149	Début	2016-06-06 - 10:56	2652	1 313	
	Fin	2016-06-07 - 08:49	3965		
Coulée 2	Début	2016-06-07 - 08:50	3966	225	10 000 litres d'eau
	Fin	2016-06-07 - 12:35	4191		
Bris usine 1	Début	2016-06-07 - 12:36	4192	143	
	Fin	2016-06-07 - 14:59	4335		
Coulée 3	Début	2016-06-07 - 15:00	4336	2 109	40 000 litres d'eau
	Fin	2016-06-09 - 02:09	6445		
Maintenance, bris et chantiers prioritaires	Début	2016-06-09 - 02:10	6446	1 838	
	Fin	2016-06-10 - 08:49	8284		
Débranchement	Début	2016-06-10 - 08:50	8285	3 361	
	Fin	2016-06-12 - 16:49	11646		
Maintenance, bris et chantiers prioritaires	Début	2016-06-12 - 16:50	11647	5 989	
	Fin	2016-06-16 - 20:39	17636		
Coulée 4	Début	2016-06-16 - 20:40	17637	2 299	35 000 litres d'eau
	Fin	2016-08-18 - 03:40	19936		

Une autre erreur est la prise continuelle de la hauteur du RPC qui n’a pas été fait systématiquement. La seule hauteur avec une confiance assez importante pour être tenue en compte est celle de 60 pieds mesurés le 9 juin à 2h00 (6436 minutes) avant la maintenance de 60 pieds ou 18,3 m. Ensuite la dégradation du chantier ne permettait plus de s’approcher suffisamment pour effectuer des mesures de hauteur. Finalement, les chutes de blocs répétés sur la cage inférieure ont fortement ébranlé le système d’attache des cages en général ce qui laisse une incertitude sur la hauteur réelle des cages dans le chantier.

Tableau 4-16: Commentaires expliquant les différents grands événements qui décrivent l'instrumentation.

	Commentaires
Attente	*Le début du remblayage a été repoussé. Quelques chutes de blocs.*
Coulée 1	*Début du remblayage, bouchon (6 % liant), bouchon 5 300 tonnes prévues.*
Fuites niveau 86 et 149	*Ces fuites sont extrêmement rares, imprévus malheureux.*
Coulée 2	*Le remblayage du bouchon se poursuit, il y a eu encore de la dilution de blocs qui tombent dans le chantier.*
Bris usine 1	*Les problèmes exacts et les détails qui ont forcés les arrêts ne m'ont pas été rapportés.*
Coulée 3	*Fin de coulée du bouchon (13h25 le 8 juin) et ensuite résiduel, 3,1 % liant.*
Maintenance, bris et chantiers prioritaires 1	*Le chantier n'a pu être terminé d'être remblayé, des bris à l'usine ont forcé le rapport du remblayage.*
Débranchement	*Pour une raison inconnue, les datalogger ont été débranchés.*
Maintenance, bris et chantiers prioritaires 2	*Le chantier n'a pu être terminé d'être remblayé, des bris à l'usine ont forcé le rapport du remblayage.*
Coulée 4	*Le chantier a débordé dans la dernière coulée, les dataloggers ont dû être sauvés in extremis.*

Un chantier de 13 500 tonnes, comme le 262-20-35A, remblayé en continu aurait pris autour de 2 jours pour un remblayage, malheureusement les circonstances ont été tout autre. Nous avons pu récolter des données seulement sur 14 jours (avec 2 jours sans données) car suite au débordement du chantier, les dataloggers ont dû être débranché et mis en sécurité.

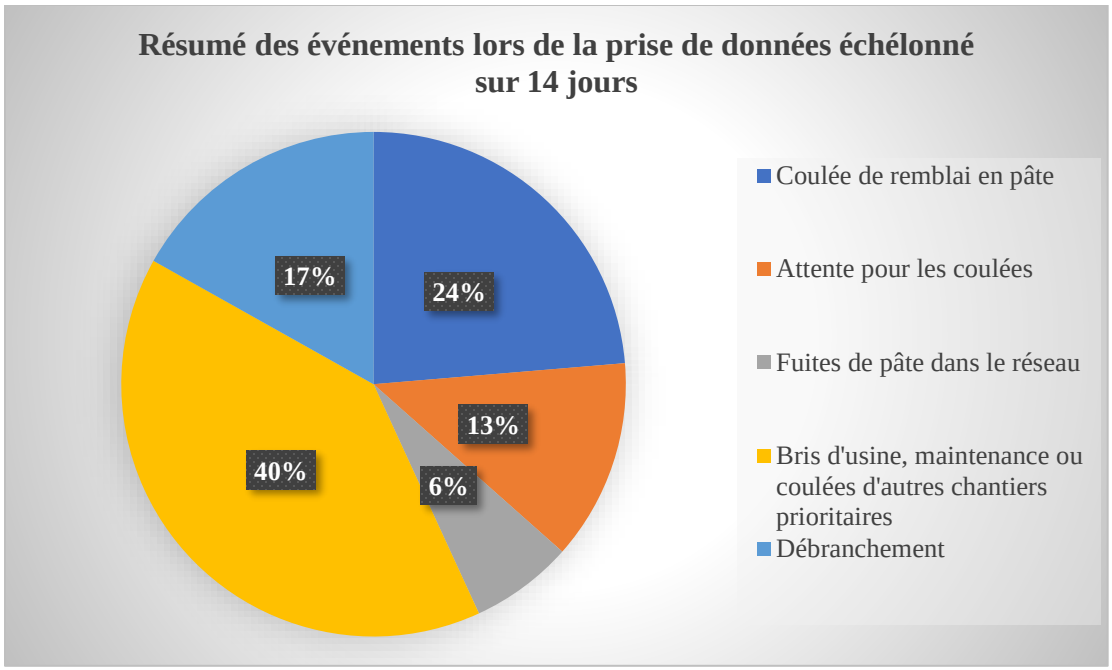


Figure 4-9: Graphique en secteurs des événements en termes de pourcentage

Lors des coulées, les hanteurs planifiés n'ont pas pu être exactement suivi, le Tableau 4-17 résume en revanche les hauteurs réelles mesurées lors de l'intallation.

Tableau 4-17: Données de chantier de mesure d'hauteur

Paramètres	**Valeur**
Hauteur moyenne du chantier	*32,5 m*
Hauteur de RPC vis-à-vis les cages	*33,1 m*
Largeur exposé primaire	*18,3 m*
Largeur par rapport au bloc B	*16 m*
Hauteur cage 1 par rapport au plancher	*1,9 m*
Hauteur cage 2 par rapport au plancher	*6,7 m*
Hauteur cage 3 par rapport au plancher	*17,3 m*
Hauteur cage 4 par rapport au plancher	*23,1 m*
Dernière mesure de RPC le 9 juin à 2:00 Am donc 6 436 minutes	*18,3 m*

La Figure 4-10 montre des données qui aurait été très importante, c'est-à-dire au bas du chantier dans la cage 1. Les nombreuses chutes de blocs ont malheureusement eu raison des équipements qui ont rapportés des données complètement inutilisables. On voit aussi très bien le grand trou au milieu des données qui correspond à l'arrêt de prise de données. Les dataloggers avait des batteries

pour compenser un débranchement accidentel, mais celle-ci avait une autonomie d'environ 1 journée seulement. Je n'avais pas un accès quotidien au chantier pour éviter ce genre de problème, heureusement que quelqu'un ait eu la présence d'esprit de rebrancher le système environ 3 jours plus tard.

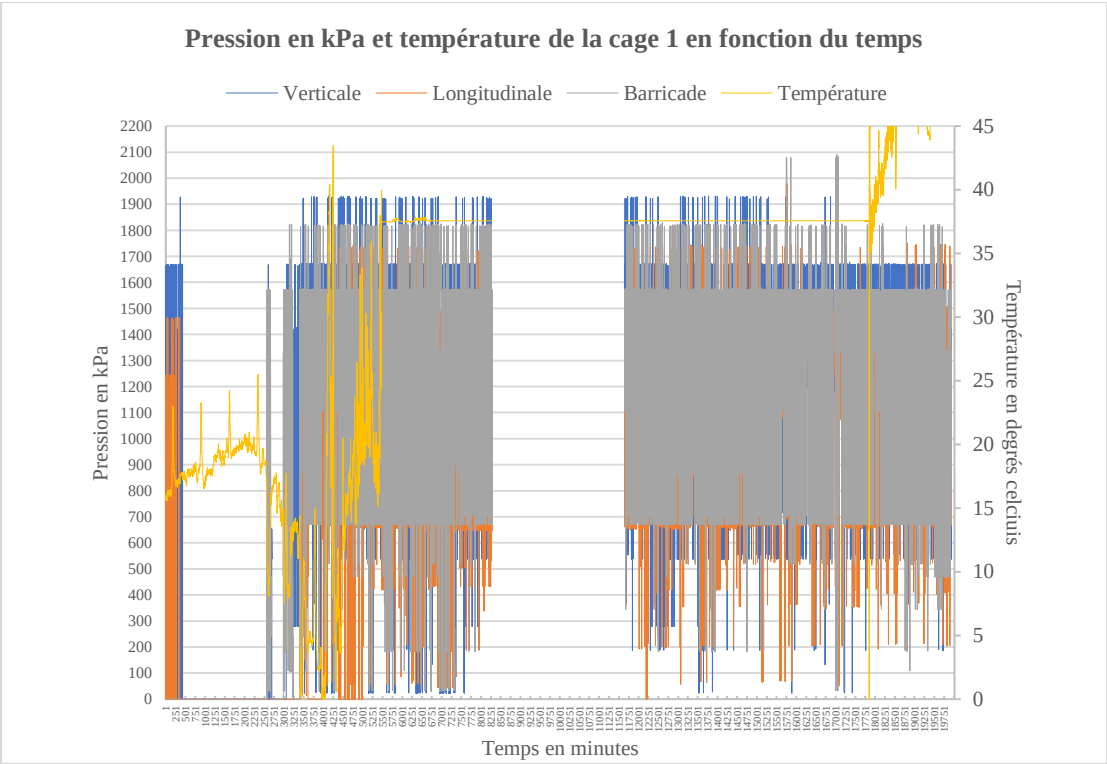


Figure 4-10: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 1.

La Figure 4-11 montre que les données enregistrées dans la cage numéro 2 sont nettement plus intéressantes. C'est lors de la troisième coulée (4 336 à 6 445 minutes) que le RPC a atteint la cage 2, tout de suite les pressions longitudinales et de barricade augmentent jusqu'à environ 40 kPa. Lors de la troisième coulée, le bouchon n'était toujours pas terminé et c'est pourquoi le début de la coulée numéro 3 avait encore 6 % liant. Les pressions verticales augmentent un peu plus, soit jusqu'à 50 kPa. Les pressions ont tendance, excepté pour les verticales, à baisser tranquillement jusqu'à 8 285 minutes exactement où les batteries n'ont plus suffi pour garder le système d'acquisition fonctionnel. Cet événement malheureux vient vraiment encore une fois diminuer la qualité des données. Lors du rebranchement, les pressions poursuivent leur lente ascension qui correspondent au gain de résistance. Ensuite les pressions augmentent à nouveau lors du début de

la coulée 4 (17 637 minutes) et comme le chantier a débordé, tout l'appareillage a été débranché par l'équipe de LaRonde pour sauver le datalogger. Malheureusement, ce geste vient priver l'étude de précieuse données lors de la cure à long terme.

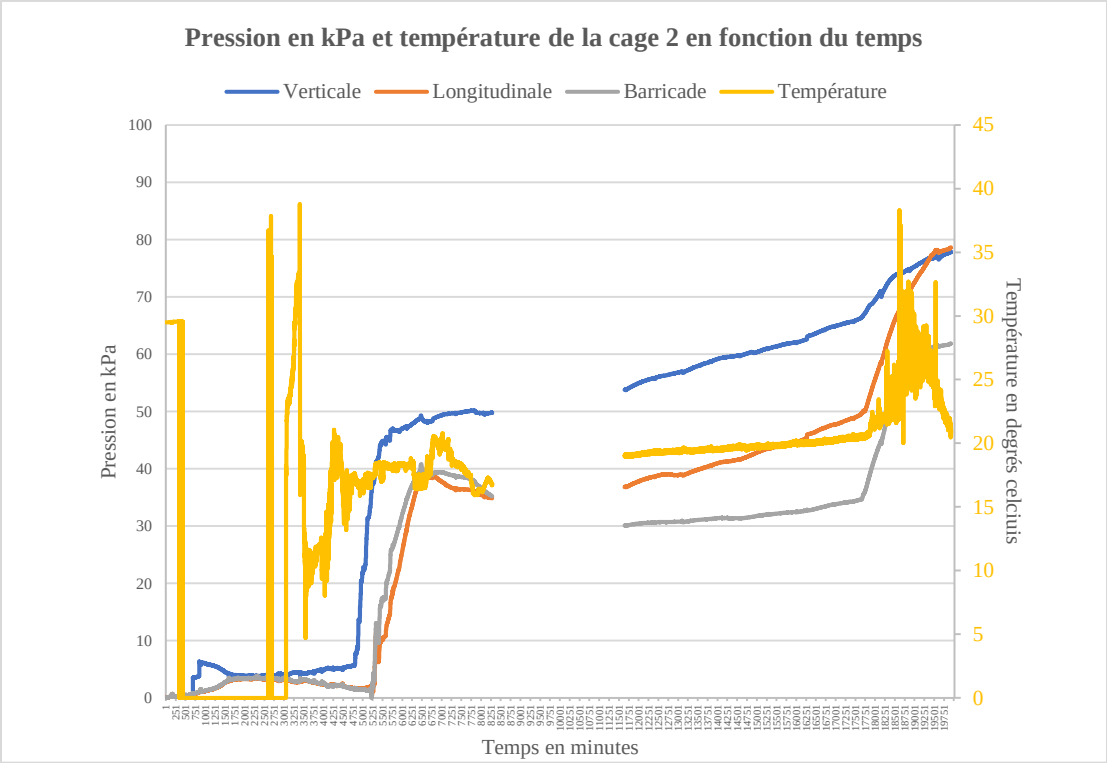


Figure 4-11: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 2.

La Figure 4-12 est un graphique montrant les différentes pressions dans l'intervalle de temps entre la première et la troisième coulée. Un intervalle de temps sans interruption avec une bonne qualité de données. On voit la même monté rapide de pression pour atteindre près de 40 kPa en pressions longitudinales et dans le sens de la barricade et près de 50 kPa pour les pressions verticales, des pressions relativement basses.

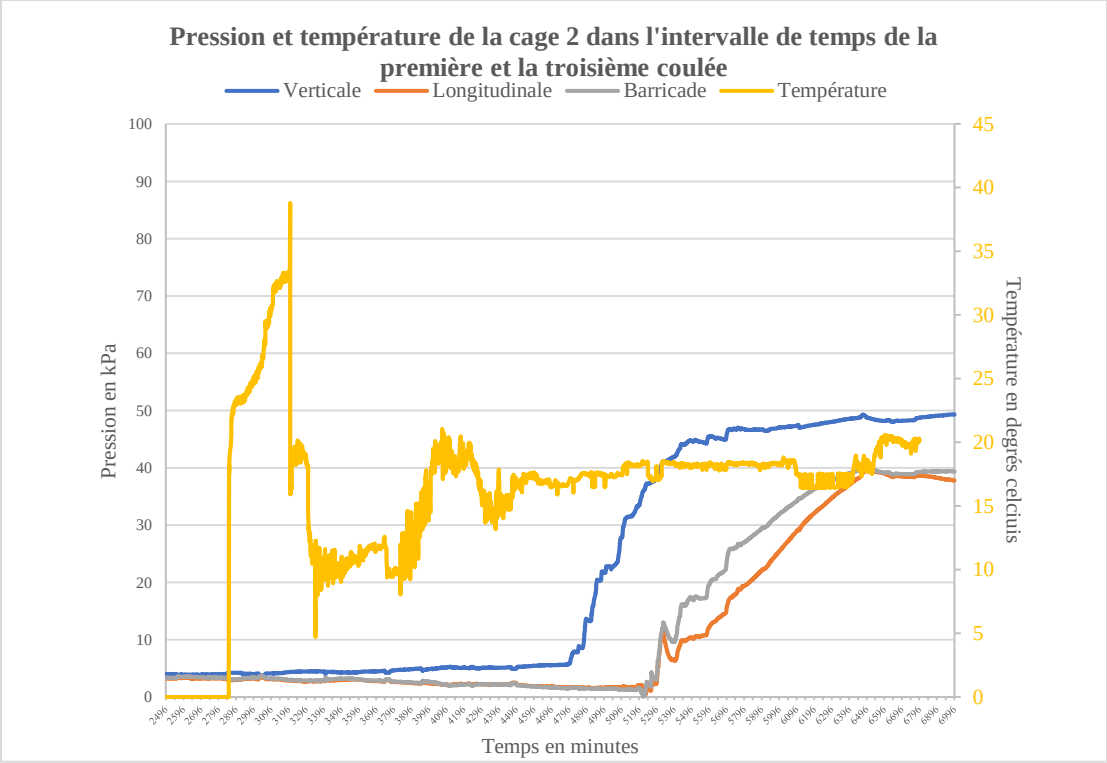


Figure 4-12: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 2 dans l'intervalle de temps entre la première et la troisième coulée.

La Figure 4-13 montre la légère remontée de pressions dans la cage 2, situé à 6,5 m de hauteur dans le bouchon du chantier. Comme le RPC est déjà est cure depuis plus ou moins 7 jours, il est normal que les pressions montent très peu. On ne voit pas non plus d'impact du rinçage de la ligne de RPC à la fin de la dernière coulée sur le RPC comme dans certaines études.

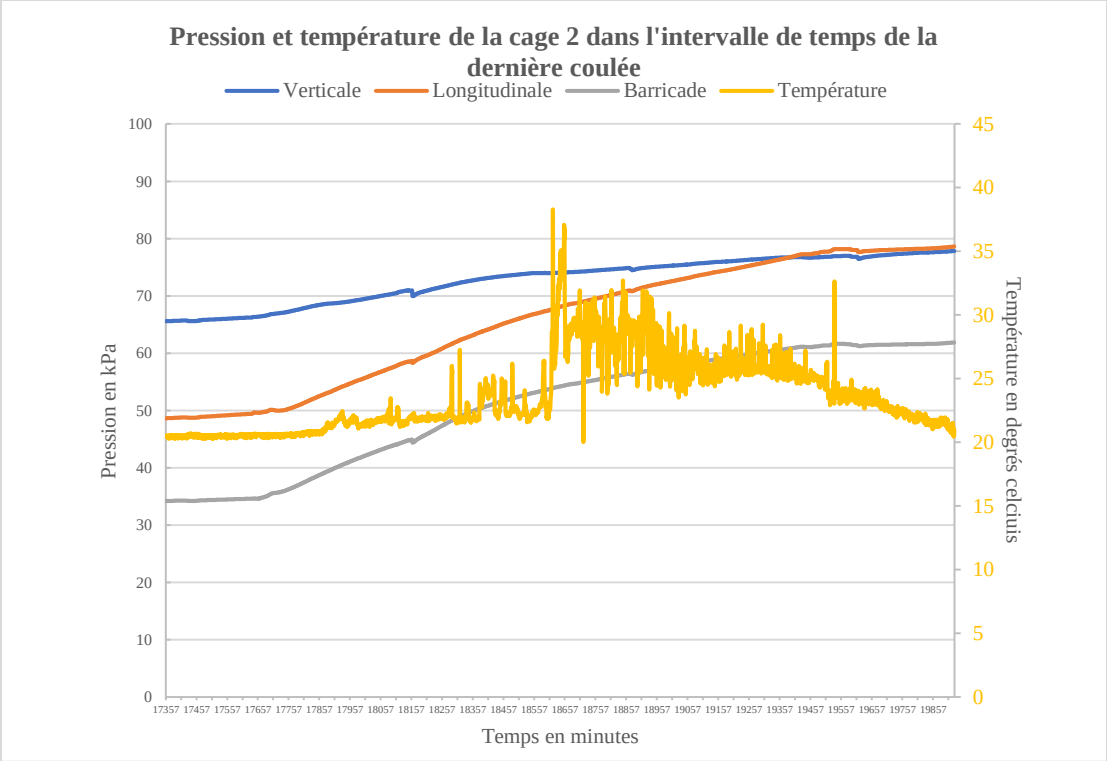


Figure 4-13 : Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 2 dans l'intervalle de la dernière coulée.

La Figure 4-14 permet d'apprécier les pressions exercées dans la troisième cage dans l'intervalle de temps de la dernière coulée. Il aurait été intéressant de voir l'évolution des pressions lors de la cure sur une plus longue période de temps, le débranchement hâtif demeure très dommage. Comme pour la cage 2, les pressions longitudinales et de barricade sont quasi identiques et se suivent presque parfaitement. Les valeurs de pressions verticales sont quant à elle plus élevé, mais demeurent « parallèle » aux deux autres.

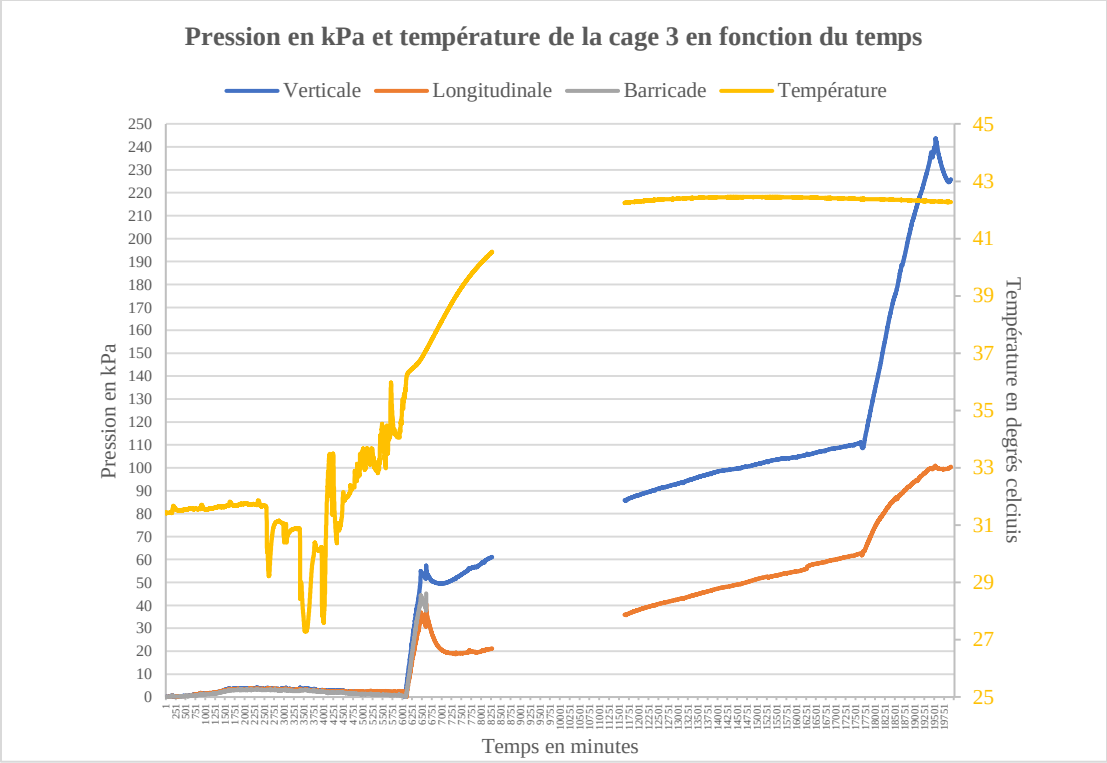


Figure 4-14:Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius en fonction du temps en minute pour la cage 3.

La Figure 4-15 offre une meilleure résolution comme l'intervalle de temps montré est plus court. Dans la coulée 3, il y a eu un changement de recette entre le début de la coulée et la fin passant d'un mélange de bouchon (6 % liant) à un mélange de résiduel (3,1 % liant). La cage 2 est donc comme prévu dans le bouchon alors que la cage 3 est dans le résiduel. On voit mieux ici que les pressions augmentent rapidement au départ avant de baisser à mesure que le début de l'hydratation débute. Le capteur de pressions dans l'axe de la barricade a dû être enlevé des graphiques dès qu'il a commencé à enregistrer des valeurs impossibles. Les derniers instants enregistrés des pressions dans la cellule 3 lors de l'ultime coulée ne montrait rien de très intéressant, donc la figure n'est pas montrée.

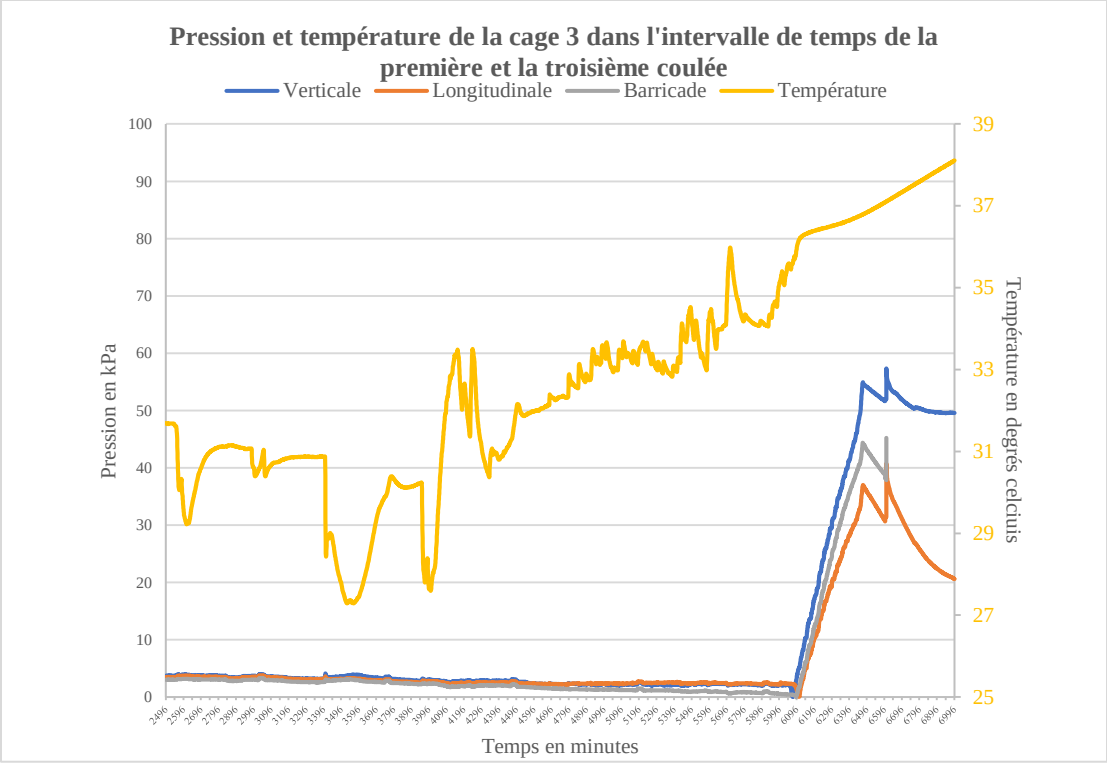


Figure 4-15: Pressions verticales, longitudinales et dans le sens de la barricade en kPa, température en Celsius dans l'intervalle de temps entre la première et la troisième coulée.

L'ultime cage qui est demeuré très longtemps suspendu dans le vide sans protection n'a pas permis d'enregistrés aucune valeur qui vaille la peine d'être discuté. Il est fort probable que cette cage ait essuyé plusieurs impacts de chutes de blocs. Il faut rappeler que peu après la coulée numéro 3, l'accès supérieur du chantier a dû être condamné juste devant les dataloggers comme le terrain était extrêmement instable.

Dans certaines études *in situ*, des augmentations de pressions avait été observé lors des rinçages avec de l'eau avant et après les coulées de RPC. Ce phénomène n'a pu être observé à la mine LaRonde.

4.5 Résultats de la modélisation d'une barricade de stériles pour la retenue du RPC à l'aide de FLAC^{3d}

Comme résumé à la Figure 2-9 et plus tôt dans ce mémoire, 4 types de rupture de barricade de stériles ont été suggérés.

- L'érosion externe est inspirée d'un phénomène qui se produit avec les digues en surface. Dans le cas des digues, un niveau d'eau trop important vient passer par-dessus le niveau de la crête pour emporter une partie de l'ouvrage. Sous terre, ce type de rupture se produirait lorsque la barricade donne l'impression, lors de l'inspection du côté aval, que le toit est bien scellé alors que ce n'est pas le cas. C'est aussi une situation où aucun béton projeté n'est utilisé. En général, la fuite est rapidement observée et la situation est corrigée avant que l'ouvrage soit entrainé.
- L'érosion interne peut se produire sous terre si la granulométrie dans l'ouvrage n'est pas adéquate. L'utilisation de béton projeté sur toute la hauteur de l'ouvrage peut empêcher le phénomène de se produire.
- Les deux derniers types de rupture : par érosion de surverse ou par poinçonnent. Dans le cas de l'érosion régressive, ce n'est pas la barricade en tant que tel le problème, mais plutôt le terrain sur lequel la barricade est appuyée. La roche encaissante ou le matériau de la barricade est lentement emporté jusqu'à ce que l'ouvrage ne tienne plus. Le point de faiblesse le plus fréquent est au toit comme il y a beaucoup moins de matériau, plus de fines et parfois absence de béton projeté. Comme ce phénomène peut être évité par des inspections rigoureuses et une formation adéquate des opérateurs de chargeuse-navettes, ce type de rupture ne sera pas considéré dans les modélisations.
- En définitive, la rupture par érosion de surverse est probablement le type de rupture le plus facilement modélisable bien que ce type de rupture ne soit possible que si les parois du point de soutirage sont lisses et lubrifiées avec un angle de frottement interfacial compris entre 0° et 20° au maximum. Ce type de rupture demeure en pratique peu probable due au fait que la rugosité ou le grillage par exemple rende le point de soutirage plutôt rugueux que lisse.
- La rupture par érosion de surverse n'est pas une rupture fréquente mais une hypothèse de conception. L'érosion de surverse suppose que toute ta barricade se déplace comme d'un

seul monolithe dans le point de soutirage. Comme la rugosité à l'interface barricade-encaissant est très élevée, la résistance de la barricade en elle-même sera inférieure à la résistance au cisaillement à l'interface et la rupture. La rupture se produit donc à travers la barricade, dans le matériau lui-même. C'est le seul type de rupture qui est considérée dans le modèle.

4.5.1 Création de la géométrie du modèle dans le code Flac^{3D}

La première étape avant de lancer la modélisation est tout d'abord de construire les blocs qui constituent le modèle dans une fonction « Fish » appelée « extension » en fonction des paramètres présentés plus haut. Avant d'aller plus loin, une attention particulière doit être portée au maillage pour s'assurer qu'il est bien distribué et qu'il n'a pas de coupure entre les blocs. Ensuite, on attribue des propriétés aux différents groupes de blocs avec la fonction Fish « prop » soit celles de l'encaissant, de la barricade et du RPC. Aussi, on doit, comme montré dans la Figure , bloquer différents plans pour que le modèle ne se déforme pas au-delà des conditions aux limites avec la fonction « cond ». De la même manière que l'impact du remblayage n'a plus d'impact sur le massif rocheux passé une certaine distance. Une fois la géométrie avec le maillage de chacun des blocs, les propriétés et les conditions aux limites déterminées, on applique la gravité au modèle (étape 1) et un premier cycle de 5000 itérations est fait pour faire converger le modèle et vérifier que tout est normal. À noter que dans l'étape 1, la barricade n'est pas présente pour représenter le mieux possible les conditions de terrain. L'étape 2 consiste à remettre les déplacements à zéro, à rajouter la barricade et refaire un autre cycle de 5000 itérations afin de vérifier que tout est normal avant d'aller plus loin, À cette étape, on remarque l'impact du poids de la barricade sur le plancher de la galerie de soutirage. Pour l'étape 3, on applique une pression dans le chantier, mais elle est la même peu importe la hauteur pour vérifier que ces pressions sont appliquées aux bons endroits dans le modèle. Une troisième itération de 5 000 itérations est faite et comme à chaque étape, les déplacements dans la barricade sont enregistrés et une sauvegarde est faite. Avant de commencer la prochaine étape, les déplacements sont remis à zéro. L'étape 4 est celle qui est cruciale, c'est lors de celle-ci qu'on applique une pression horizontale en fonction des propriétés de différents RPC et cette pression varie en fonction de la hauteur dans le chantier. Pour cette dernière étape, 10 000 itérations sont faites.

Pour réaliser ces quatre étapes, une demi-journée de calculs est nécessaire, donc on comprend rapidement que le temps pour faire les itérations a un impact direct sur le nombre de scénarios qu'il a été possible de réaliser dans le cadre de ce séjour d'apprentissage. Fait intéressant, le programme Fish comporte 506 lignes, les possibilités d'erreurs sont donc multiples et il faut être très vigilant. Les segments clés du code ont été mis à l'ANNEXE G – Étapes de la modélisation FLAC 3D.

Scénario 1

En fonction des propriétés des remblais en pâte des mines LaRonde, Westwood, Goldex et Casa Berardi, différentes pressions vont être générées tel que présenté dans le Tableau 4-18. À noter que les poids volumiques du RPC des mines Goldex et Westwood sont les mêmes.

Tableau 4-18: Propriétés de différents RPC retrouvés dans différentes mines

Mine	**C_w**	**Liants**	**B_w**	**ρ_s-résidus**	**ρ_s-remblai**	**ρ_h-remblai**	**Poids volumique**
	(-)		(-)	kg/m^3	N/m^3	kg/m^3	kN/m^3
LaRonde	0,760	20GU/80Slag	0,055	3500	147,33	2187,50	21,459
Westwood	0,745	20GU/80Slag	0,07	2800	117,49	1919,12	18,827
Goldex	0,745	20GU/80Slag	0,07	2800	103,31	1919,12	18,827
Casa Berardi	0,745	20GU/80Slag	0,07	3120	132,13	2025,18	19,867

Scénario 2

La hauteur du chantier (25 m, 30 m, 35 m, 40 m, 45 m et 50 m) a été variée avec deux positions (8m et 16 m) de barricade.

Scénario 3

Les dimensions (carré de 4,5 m, 5 m et 5,5 m) de la galerie et donc de la barricade ont été simulées.

Scénario 4

Les déplacements dans la barricade ont été déterminés en faisant varier la position de la barricade par rapport à l'épaulement du chantier (16 m, 12 m, 8 m et 5 m). Ces déplacements ont été simulés pour les différentes mines étudiées.

Scénario 5

Une analyse plus poussée des résultats des scénarios 1 à 4 a montré que le maillage n'était pas tout à fait adéquat et que certaines problématiques avec le code devaient être corrigées. Quatre essais ont donc été fait en simulant 2 positions de barricade différentes à 16 m et 8 m avec et sans interface tel que présenté aux Tableau 4-3 et Tableau 4-4.

Tableau 4-19: Résumé des déplacements moyens selon deux emplacements en « x », au centre selon « y » et sur toute la hauteur en « z » dans les barricades de stériles avec différents paramètres

	X	**Y**	**Z**	**Déplacement en X (mm)**	**Déplacement en Z (mm)**
LaRonde (8 m) pas d'interface	16	1,25	moy	0,0118	0,9410
LaRonde (8 m) avec interface	16	1,25	moy	0,0123	0,9610
LaRonde (8 m) pas d'interface	18	1,25	moy	0,0142	0,9470
LaRonde (8 m) avec interface	18	1,25	moy	0,0144	0,9260
LaRonde (16 m) pas d'interface	16	1,25	moy	0,0156	0,9470
LaRonde (16 m) avec interface	16	1,25	moy	0,0118	0,9410
LaRonde (16 m) pas d'interface	18	1,25	moy	0,0180	0,9550
LaRonde (16 m) avec interface	18	1,25	moy	0,0142	0,9470

Tableau 4-20: Déplacements en "x" et en "z" à différents endroits à l'intérieur de la barricade en fonction de différents paramètres

	X	Y	Z	Déplacement en X (m)	Déplacement en Z (m)
LaRonde (16 m) pas d'interface	16	2,25	4,5	-3,00E-05	-0,0003
	18	2,25	4,5	-5,25E-05	-0,0008
	20	2,25	4,5	-7,66E-05	-0,0008
LaRonde (16 m) avec d'interface	16	2,25	4,5	-4,51E-05	-0,0007
	18	2,25	4,5	-5,87E-05	-0,0008
	20	2,25	4,5	-6,71E-05	-0,0008
LaRonde (8 m) pas d'interface	16	2,25	4,5	-1,57E-05	-0,0007
	18	2,25	4,5	-3,42E-05	-0,0008
	20	2,25	4,5	-4,77E-05	-0,0008
LaRonde (8 m) avec d'interface	16	2,25	4,5	-3,19E-05	-0,0007
	18	2,25	4,5	-3,54E-05	-0,0008
	20	2,25	4,5	-5,84E-05	-0,0008

À la lumière de ces résultats (Tableau 4-3 et Tableau 4-4), il est possible de prédire que les déplacements seront minimes à l’intérieur de la barricade. La Figure 4-16 et la Figure 4-17 permettent d’apprécier différemment ces résultats.

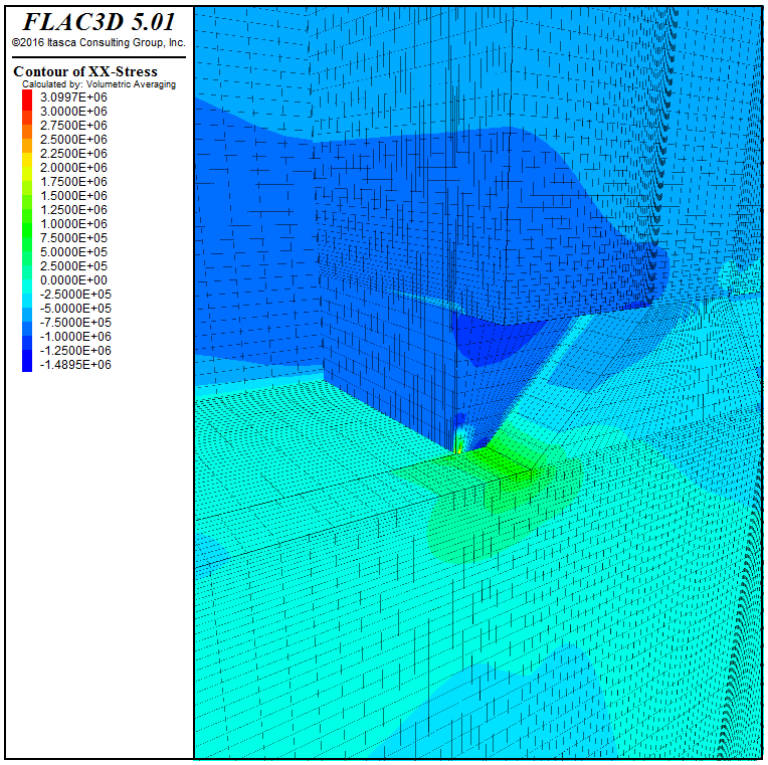


Figure 4-16: Cas de la mine LaRonde, barricade à 8 m, déplacement en « X », chantier de 45 m.

Dans la pratique, la précision de l'extensomètre est de ±0,375 mm et les prédictions de déplacements sont toutes nettement sous la précision de l'extensomètre. On peut donc s'attendre à ce que l'extensomètre mesure sous terre des déplacements locaux non représentatifs des déplacements provoqués par les pressions horizontales du RPC. Bien que les tests à l'intérieur d'une barricade de stériles n'aient pu être réalisés, on voit grâce à la modélisation que ces déplacements auraient été très minimes. On rappelle que des pressions maximales de 250 kPa peuvent difficilement faire bouger de manière significative des empilements rocheux de plusieurs centaines de tonnes. Sur la Figure 4-16, les déplacements sont peu importants sur la barricade. La forme du chantier dans la modélisation qui se voulait représentative de chantiers souterrains montre l'étendue des contraintes qui sont reprises dans les murs du chantier plutôt que directement par la barricade.

Dans le cas du chantier de la mine LaRonde encore avec des hauteurs de 30 m plutôt que 45 m, on voit des déplacements plus faibles, mais c'est le même genre de résultats qui est extrait lors de la modélisation qui sont présentés à la Figure 4-17 de manière graphique.

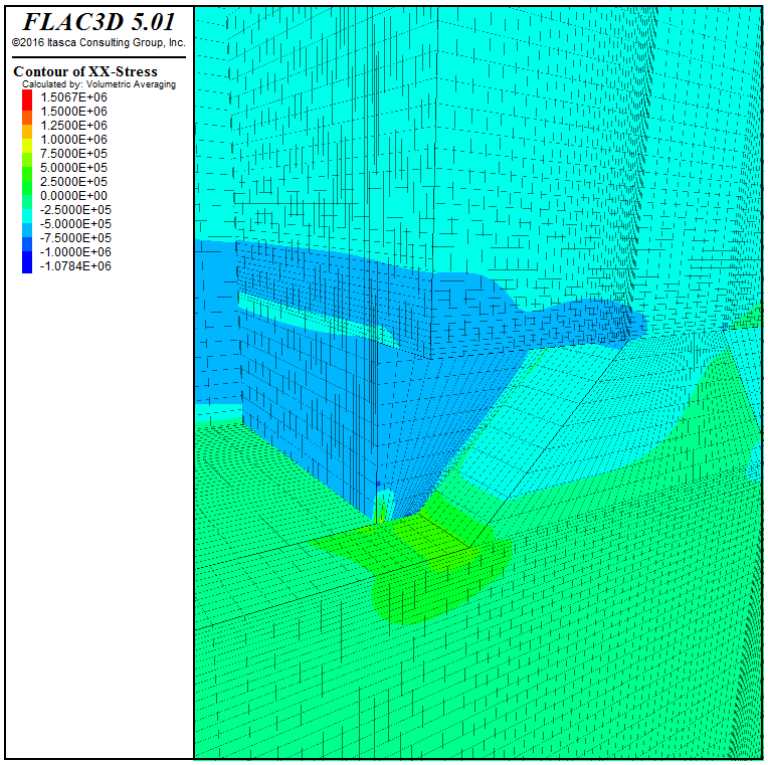


Figure 4-17: Cas de la mine LaRonde, barricade à 8 m, déplacement en « X », chantier de 30m.

Par manque de temps, comme le **Modèle 3** était celui qui semblait montrer les meilleurs résultats, c'est avec celui-ci que les calculs ont été privilégiés. Pour réaliser cette étude paramétrique, différents paramètres ont été modifiés pour tenter de mieux comprendre et mesurer leurs impacts sur les déplacements dans la barricade. Le but de suivre les déplacements dans la barricade était de pouvoir par la suite tenter de prévoir les valeurs qui seraient mesurées par les extensomètres en condition *in situ*. À noter que dans tous les scénarios, les chantiers étaient remblayés de manière continue.

4.5.2 Retour sur les différents scénarios de modélisation

En guise de conclusion de ce chapitre, les simulations numériques faites avec le code FLAC^{3D} ont permis de mieux comprendre le comportement des barricades de stériles. Le temps pour faire varier différents paramètres était limité, par contre il a été montré que le déplacement dans les barricades risque d'être négligeable et sous les valeurs de détection des instruments. De plus, telle que l'expérience souterraine semble le montrer, ces ouvrages sont très stables malgré qu'ils subissent des contraintes maximales dès leur début de mise en service, c'est-à-dire lors de la retenue du RPC en phase orthotrope et ce, malgré le fait que dans le cas du modèle les chantiers étaient remblayés

en une seule coulée. L'emplacement de la barricade lui permet aussi de subir moins de pressions. En effet, plus la barricade est placée loin de l'épaulement, moins les déplacements mesurés étaient importants. Malgré tout, ce modèle était basé sur de nombreuses hypothèses. Il ne pourra jamais représenter le vrai comportement des barricades en milieu souterrain. Les incertitudes les plus importantes sont au niveau des propriétés géomécaniques des barricades et sur les propriétés du RPC qui évoluent dans le temps et dépendent des conditions de drainage, de la température, de la teneur en eau, de l'homogénéité de la pâte et du rythme de coulée de la pâte. Néanmoins, les simulations numériques permettent d'obtenir des résultats originaux intéressants.

Il est important de noter que dans le cadre d'un programme de collaboration France-Québec appelé Samuel-de-Champlain, j'ai passé 5 semaines à l'école des Mines de Nancy (France) pour réaliser ces modélisations. Durant ce séjour, j'ai appris à utiliser le logiciel et c'est uniquement durant cette période de temps que j'ai eu accès à une licence FLAC^{3D}. Certaines réanalyses et modifications du code, particulièrement en ce qui a trait au maillage auraient pu être effectuées avec plus de temps.

CHAPITRE 5 DIMENSIONNEMENT DES BARRICADES DE STÉRILES

Malgré le développement récent de formules de dimensionnement des barricades en roches stériles (Li et al., 2011; Yang et al., 2014, 2016), il n'en demeure pas moins que le besoin d'avoir des formules plus simples se fait sentir par l'industrie minière. Dans ce chapitre, une méthode de dimensionnement des barricades de roches stériles sera proposée.

5.1 Modèle empirique de dimensionnement des barricades de stériles

L'originalité et le développement d'une formule de dimensionnement empirique débute par un élément particulier qu'on retrouve dans plusieurs règles du pouce dans le domaine de la construction de barrages de petites envergures. Cet élément, c'est le fait d'établir une largeur au toit minimum qui est fixée à 3 m. Cette largeur est justifiable par plusieurs éléments qui proviennent essentiellement des nombreuses observations de tâches effectués sous terre et par l'incertitude importante sur la mesure de la largeur réelle au toit qu'une barricade aura après sa construction. Dès que l'interface entre la barricade et le toit est fermée, il est impossible pour le constructeur d'affirmer que le point de contact entre le toit et le matériau rocheux restera inchangé suite aux nombreuses actions dues à la plaque de poussée.

5.1.1 Proposition du modèle empirique

La Figure 5-1 présente la géométrie en 2D d'une barricade de roches stériles construite dans une galerie de soutirage d'une mine et montrant les paramètres et les contraintes en jeu.

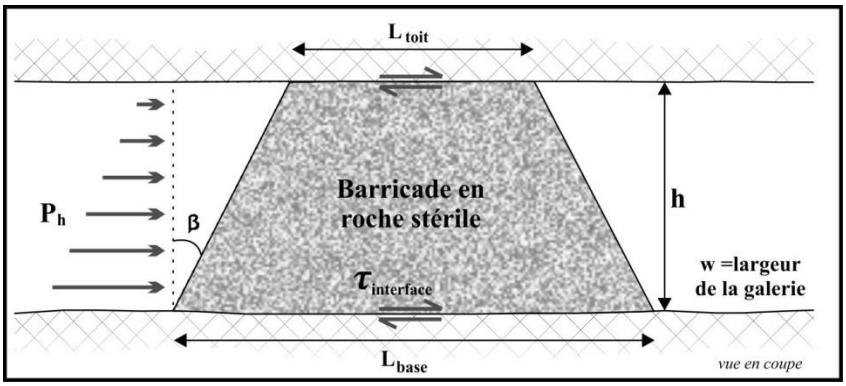


Figure 5-1: Coupe d'une barricade de roches stériles et les forces en jeu.

Empiriquement, il est possible de déterminer la longueur de barricade au toit qui est recommandée lorsque du béton projeté est appliqué sur la face aval de la barricade de roches stériles. Une proposition de formule adimensionnelle peut avoir la forme simple suivante :

$$L_{barricade} = \mathrm{F}_{pression} + \left(\frac{\gamma_{RPC} * h * (h+w)}{2(h+w) * \gamma_R * h * \tan\left(R \log_{10} \frac{s}{\sigma_n} + \phi_R \right)} \right) \qquad [5\text{-}1a]$$

$$L_{barricade} = \mathrm{F}_{pression} + \left(\frac{\gamma_{RPC}}{2 * \gamma_R * \tan\left(R \log_{10} \frac{s}{\sigma_n} + \phi_R \right)} \right) \qquad [5\text{-}1b]$$

$$L_{barricade} = \mathrm{F}_{pression} + \frac{\gamma_{RPC}}{2 * \gamma_R} \tan\left(R \log_{10} \frac{s}{[\gamma_R * h]} + \phi_R \right)^{-1} \qquad [5\text{-}1c]$$

Comme l'industrie minière s'est toujours basée sur la règle du pouce et qu'il se révèle très ardu de déterminer les pressions horizontales, le facteur de pression vient palier le besoin de déterminer cette pression en proposant des valeurs en mètre fixes (constantes). Il est proposé deux constantes soit l'une de « 3 m » pour un chantier d'une hauteur de moins de 15 m et pour un chantier de plus de 15 m, la constante proposée est de « 6 m ».

Pour un chantier avec colonne de RPC de moins de 15 m :

$$L_{barricade} = 3\mathrm{m} + \frac{\gamma_{RPC}}{2 * \gamma_R} \tan\left(R \log_{10} \frac{S}{[\gamma_R * h]} + \phi_R \right)^{-1} \qquad [5\text{-}2]$$

Pour un chantier avec colonne de RPC de plus de 15 m :

$$L_{barricade} = 6\mathrm{m} + \frac{\gamma_{RPC}}{2 * \gamma_R} \tan\left(R \log_{10} \frac{s}{[\gamma_R * h]} + \phi_R \right)^{-1} \qquad [5\text{-}3]$$

La revue de littérature a permis néanmoins de montrer que les pressions exercées sur une barricade est au maximum de 250 kPa et que très peu de ruptures sont rapportées et que celles-ci sont dues

à des négligences de construction plutôt que de conception. De plus, le dimensionnement n'est jamais basé sur une formule de dimensionnement permettant de connaître le FS.

Il ne faut pas une analyse très poussée pour réaliser que les variations de paramètres autant des stériles qui composent la barricade que du remblai n'ont pas une énorme importance sur la formule de dimensionnement proposée, en fait cela reflète bien les réalités minières. Toutes les mines interrogées utilisent plus ou moins de toute façon des dimensionnements similaires comme les échanges entre les ingénieurs en contrôle de terrain sont fréquentes. L'avantage de cette formule simple c'est qu'elle ne donne pas de valeurs étranges de plus de dizaine de mètres comme d'autres proposées dans la littérature et ne nécessite pas le choix difficile d'un facteur de sécurité. Ironiquement, la plus grande faiblesse de cette formule est que les ingénieurs font déjà ce type de design sans avoir eu recours à cette formule.

5.1.2 Détermination des paramètres du modèle

La formule empirique proposée tient compte de :

- La hauteur de la barricade (h) en général de plus ou moins 4,5 m ;
- La largeur de la barricade (w) en général de plus ou moins 4,5 m;
- Le poids volumique du RPC (γ_{RPC}) qui varie en général entre 18 et 26 kN/m^3, si ce poids volumique n'est pas connu, la moyenne de 22 kN/m^3 peut être utilisée ;
- La rugosité équivalente des particules (R), il est recommandé d'utiliser 15, si la porosité après consolidation n'est pas connue (ce qui rend l'utilisation de l'abaque de la Figure 5-3 impossible);
- L'angle de friction interne du stérile utilisé est de l'ordre de 30 degrés.

La résistance au cisaillement à l'interface barricade de stériles/paroi de la galerie peut être déterminée selon le critère non-linéaire de Barton (2008). En effet, Barton (2008) a proposé un critère pour l'interface entre les empilements de roches stériles avec des surfaces rugueuses qui est donné par la relation suivante :

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan\left(JRC \cdot \log_{10}\left(\frac{S}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right) \qquad [5\text{-}4]$$

Où *JRC* = le coefficient de rugosité de l'interface (variant de 0 à 20), *S* = la résistance en compression de l'empilement de stériles (MPa), ϕ_r = angle de frottement résiduel de l'interface (°).

$$\sigma_n = \gamma_R \cdot h \qquad [5\text{-}5]$$

Où γ_R = poids volumique d'un empilement de roches stériles dont la valeur moyenne serait de l'ordre de 22 kN/m^3 selon la littérature.

Selon la gamme de variation de γ_R (entre 18 et 22 kN/m^3) et de *h* (entre 3.9 et 5 m), la contrainte normale σ_n varierait entre 70 et 110 kPa.

Suivant ce critère, il faut déterminer si l'interface est très rugueuse ou peu rugueuse. Cette décision permettra de supposer qu'il y aura rupture au sein de l'empilement de stérile « *R-Controlled* » (interface très rugueuse) ou qu'une rupture ou un glissement se produira le long de l'interface « *JRC-Controlled* » (interface lisse).

Bien que nous ne possédions pas de valeurs de rugosité (JRC) d'une galerie et comme la granulométrie d'une barricade en stériles est très variable, la question de savoir ce qui se passera à l'interface demeure. Il faut noter que le critère de Barton (2008) a été initialement formulé pour les empilements de roches stériles ou l'interface d'une digue sur une roche de fondation. Le cas d'une barricade de stériles souterraine est différent puisque l'on compte non pas seulement une interface, mais bien trois (ou quatre si le contact au toit est franc). Il pourrait exister 3 scénarios distincts où la granulométrie, la compaction, l'indice des vides et la présence de support de terrain viendront influer sur la valeur de rugosité effective (Figure 5-2).

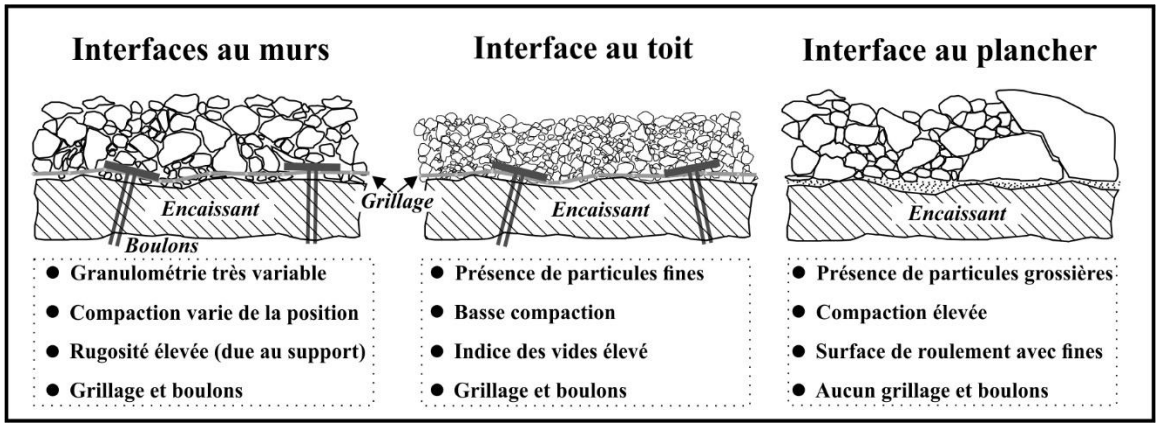


Figure 5-2: Schéma des propriétés des interfaces d'une barricade de stériles.

Par contre, il est facile d'estimer que dans tous les cas, l'interface est très rugueuse et ondulée et donc que la valeur de rugosité sera maximale (JRC = 20), peu importe l'interface. Ainsi, on supposera que la rupture risquerait de se produire non pas à l'interface, mais directement à l'intérieur des stériles composant la barricade (« *R-Controlled* »). Le critère de Barton (2008) de l'équation [6-6] est réécrit en remplaçant le JRC par un paramètre de rugosité équivalente R :

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan\left(R \cdot \log_{10}\left(\frac{S}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right) \qquad [5\text{-}6]$$

Le paramètre de rugosité équivalente *R*, peut être déterminé selon l'abaque de la Figure 5-3. Dans le cas de la mine LaRonde, l'origine des stériles est comparable à celle d'une carrière, les stériles étant très pointues et angulaires et la rugosité est considérée « très rugueuse ». En supposant une porosité de n = 20%, on pourrait par exemple obtenir une rugosité équivalente R = 15.

La résistance à la compression des particules de roches stériles *S* peut être déterminée à partir de l'abaque présenté dans la Figure 5-4, connaissant la résistance en compression simple de la roche intacte (σ_c) composant les stériles et du diamètre moyen des stériles (d_{50}).

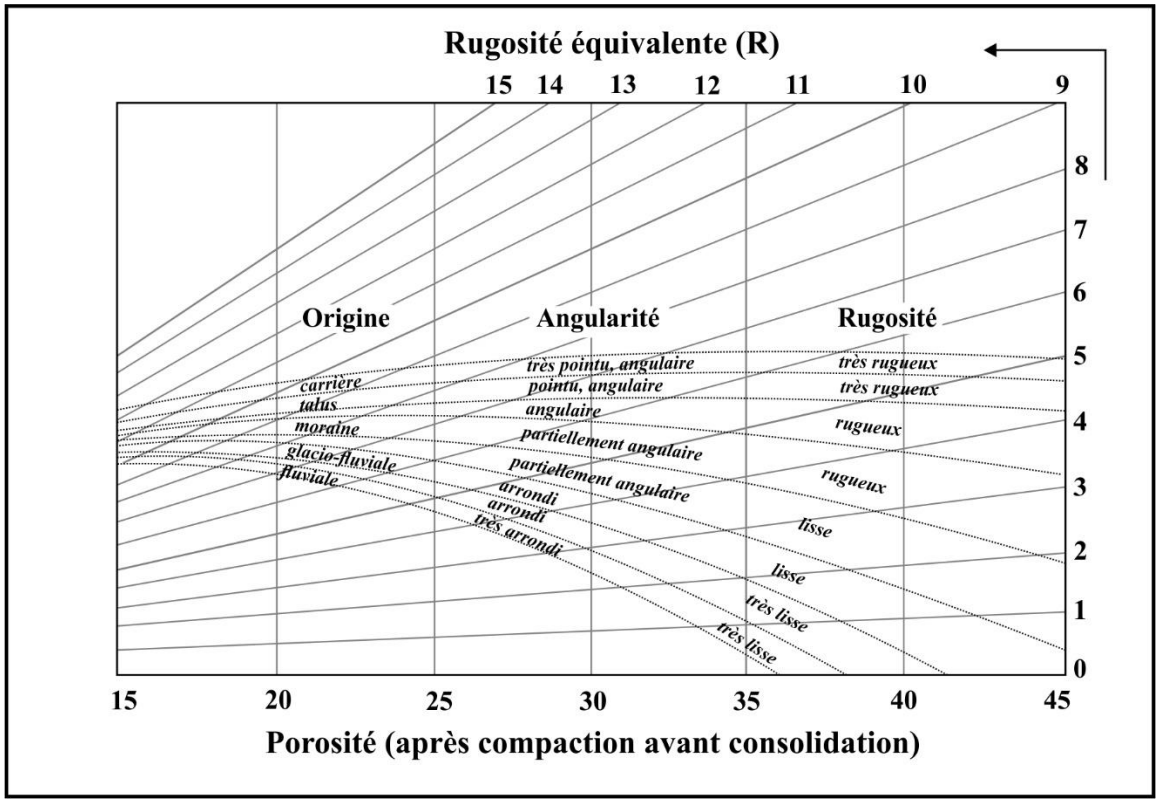


Figure 5-3: Rugosité équivalente en fonction de la porosité, de l'origine, de l'angularité et de la rugosité de stériles (adaptée de Barton 2008).

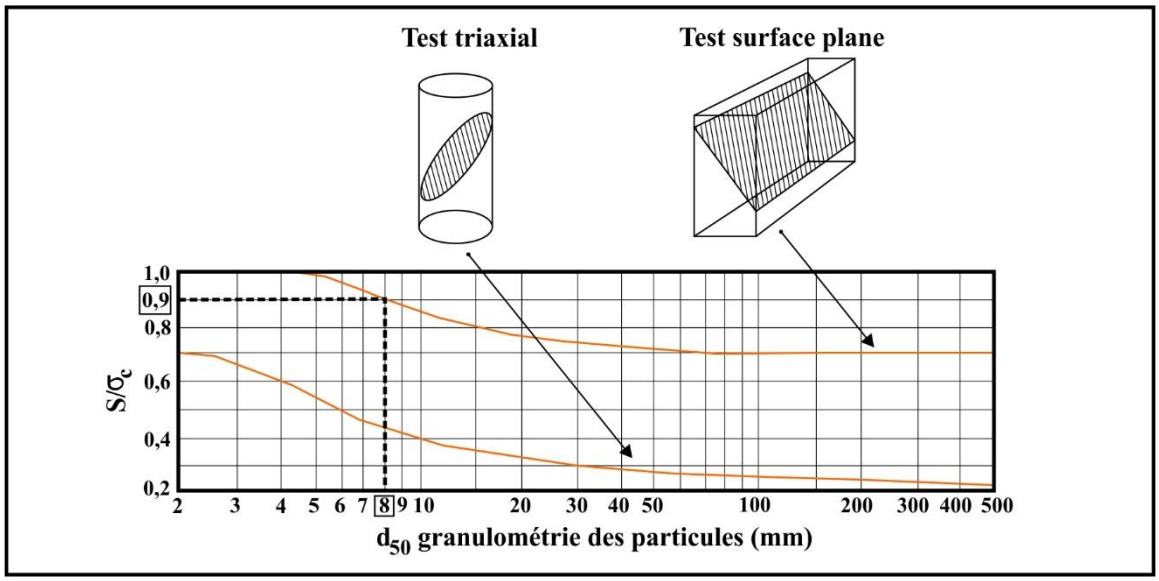


Figure 5-4: Abaque pour le choix de la valeur de S (adapté de Barton 2008).

5.1.3 Vérification du modèle empirique

Pour un chantier de moins de 15 m avec les paramètres suivants (Tableau 5-1) et en faisant varier les poids volumiques du remblai, la Figure 5-5 est obtenue.

Tableau 5-1: Paramètres utilisés pour déterminer le dimensionnement de la barricade

Paramètres	Unités	Valeurs
Hauteur (h)	m	4,5
Largeur (w)	m	4,5
R	-	15,0
S/σ_n	-	0,9
γ_{RPC}	kN/m^3	[18-26]
φ_R	°	30
γ_R (basalte)	kN/m^3	27,0

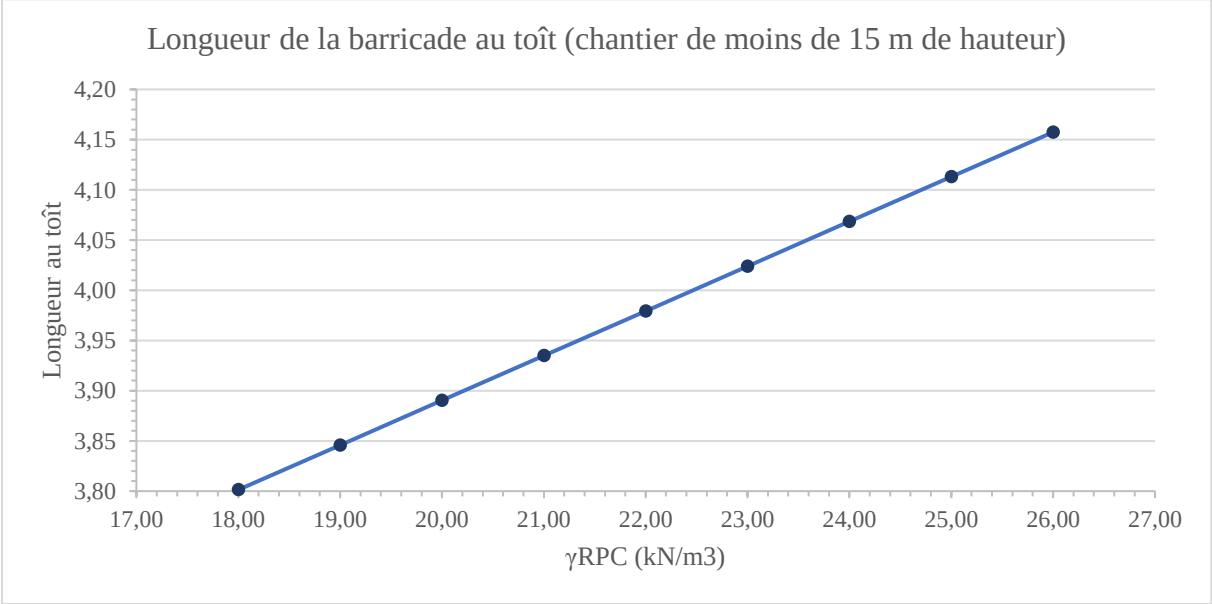


Figure 5-5: Dimensionnement de barricades en faisant varier le poids volumique du remblai (avec le coefficient de rugosité R = 3)

Le dimensionnement de la barricade de stériles va varier davantage en changeant les propriétés du stérile composant la barricade que le remblai lui-même, par exemple en utilisant une rugosité équivalente (R) de 15 plutôt que de 3, la Figure 5-6 est obtenue.

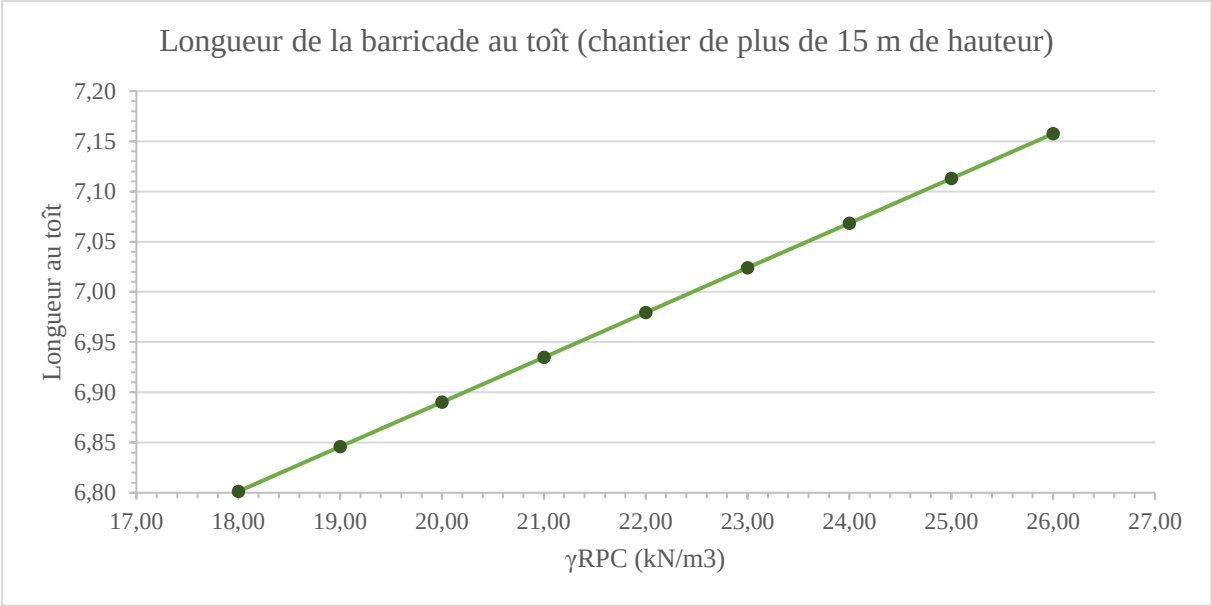


Figure 5-6: Dimensionnement de barricades en faisant varier le poids volumique du remblai (coefficient de rugosité R = 15).

5.2 Retour sur les formules empiriques de dimensionnement

Ce travail montre que de proposer un dimensionnement de barricades de stériles est ardu, en ce moment les opérations minières dimensionnent tous les jours des barricades et ce sans se référer à aucune formule de dimensionnement. Les dimensions de chantiers, de point de soutirage, les types de remblai, de stériles varient à l'intérieur d'une même opération et pourtant une mine comme LaRonde qui a construit plus de 200 barricades sans formule de dimensionnement en utilisant deux devis simples a tout de même permis de garantir la sécurité de ses travailleurs. La revue de littérature, la prise de données *in situ*, la compilation de données géotechniques, les observations montrent que le facteur déterminant dans la rupture d'ouvrage de retenue est lié à des erreurs de mauvaises constructions plutôt qu'à des erreurs de conception.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire passe en revue différentes études qui montrent l'état des connaissances actuelles concernant le remblayage minier avec du remblai en pâte cimenté de chantiers long trous. De manière générale, l'impact significatif des procédures de remblayage sur les coûts d'opérations est à noter. Aussi, il faudrait souligner l'importance de la recherche scientifique dans l'optique d'efficacité, de santé-sécurité, d'environnement, de réduction des coûts et de flexibilité pour les opérations minières souterraines. L'expérience de nombreux experts tend à démontrer qu'une supervision adéquate du cycle de remblayage et une optimisation du remblai permettraient une importante réduction des coûts.

L'opération de remblayage est intimement liée au dimensionnement des barricades qui retiennent le remblai en pâte cimenté avant qu'il devienne autoportant. Différents types de barricades ont été présentés, mais plus de détails ont été présentés concernant les barricades de stériles. Ce type d'ouvrage est le plus répandu dans les mines québécoises qui utilisent le minage par méthode long trous ou par abattage par chambres remblayées. Le dimensionnement de ces ouvrages est critique pour garantir la sécurité des travailleurs et pour optimiser le processus d'extraction de minerai en limitant les temps de coulées (vitesse de remblayage plus élevé, remblayage en continu, ouvrages non surdimensionnés mais stables).

L'utilisation du RPC permet de diminuer localement le niveau de contrainte dans le massif rocheux, diminuer la convergence des murs, réduire l'activité sismique et optimiser la récupération du minerai. Ce type de support de terrain secondaire a par contre un impact important sur les coûts de production. Les devis qui encadrent la construction de barricades de stériles sont intimement liés aux pressions qui se développent dans la colonne de RPC. Ces pressions sont variables d'un chantier à l'autre et les processus qui régissent le développement de pressions sont très complexes et spécifiques à chaque site minier (en lien avec les contraintes régionales et la nature même du remblai). Les facteurs qui influencent les valeurs mesurées comprennent le type, la hauteur rembalyée, la granulométrie et la masse volumique des résidus. Au niveau des liants, les facteurs à considérer sont le pourcentage de liants et le type. Pour la pâte, il faut penser à l'affaissement, le pourcentage solide, la vitesse de remblayage, la séquence de remblayage, la perméabilité et/ou la rétention d'eau qui vont jouer sur la consolidation gravitaire qui elle-même dépend de la granulométrie. C'est pourquoi, malgré le nombre relativement important de mesures de pressions

dans le RPC, il y a toujours énormément de phénomènes à comprendre. Une meilleure compréhension de l'ensemble de la séquence de remblayage est nécessaire et de nombreux aspects sont toujours à étudier.

Malgré tout, l'objectif de ce mémoire a été atteint, c'est-à-dire de présenter l'état des connaissances sur la mesure et la prédiction *in situ* des pressions dans le remblai en pâte cimentée et sur le dimensionnement des barricades de stériles rocheux. Ce but a été atteint grâce à une instrumentation *in situ* et à un travail de modélisation. Le travail de recherche portait entre autres aussi sur la détermination de caractéristiques géomécaniques propres aux barricades de stériles (composition, méthode de construction et distribution granulométrique) et sur leur comportement lors d'application de pression horizontale par du remblai en pâte cimenté pendant le remblayage, durant la cure et à long terme. Ces comportements ont été étudiés grâce à l'instrumentation d'un chantier souterrain et d'une modélisation numérique paramétrique.

L'utilisation de remblai en pâte cimenté est tellement ancrée dans les pratiques des mines souterraines partout dans le monde et les avantages associés avec son utilisation sont à ce point multiples, bien qu'il possible d'affirmer que son utilisation est d'avantage motivée d'un point de vue géotechnique plutôt qu'économique ou environnemental.

Les principales recommandations pour les utilisateurs de barricades de stériles sont les suivantes :

- Éloigner le plus possible les barricades de l'épaulement pour diminuer les pressions à retenir ;
- Installer une caméra dans les points de soutènement pour vérifier l'intégrité physique des barricades pour certaines coulées plus importantes ;
- Faire des tests d'épaisseur et de résistance de béton projeté sur les barricades ;
- Faire un suivi sur l'utilisation d'accélérant lors de l'utilisation de béton projeté sur les barricades. Évaluer le pourcentage de rebonds et les procédures lors de la mise en place pour assurer un bon contrôle qualité;
- Dans certaines conditions comme dans le cas de chantiers longitudinaux où de l'espace est nécessaire rapidement pour le forage de production, l'utilisation de barricades minces en béton projeté pourrait être avantageusement privilégiée ;

- Sensibiliser les opérateurs à ne pas placer de matériau de déchets et de stériles trop grossiers, de stériles très fins ou ne pas utiliser aucun bloc de RPC en tout temps et en tout lieu dans la construction des barricades. Formations, sensibilisation et suivis avec le personnel en charge de la construction des barricades de stériles ;
- S'assurer de bien préparer les devis, de faire une inspection des galeries et de noter toutes les particularités ;
- Toujours noter le nombre de godets utilisés dans une construction de barricades et l'ingénierie doit faire un suivi de ces données fiables. Une analyse par volume permet, sans même avoir à se déplacer sous terre, de valider si le devis a été suivi. Proposer un nombre minimal de godets spécifié sur le plan pour chaque barricade serait aussi envisageable ;
- Proposer un nombre minimal d'utilisation de la plaque de poussée ;
- Si la barricade n'est pas terminée dans le même période de travail, assurer un transfert efficace d'informations au contremaître qui se doit de bien la transmettre au contremaître suivant pour mentionner tout changement au niveau du devis, surtout si la barricade n'a pas été commencée exactement à l'endroit prévu sur le plan ;
- Dans le cas où il y a un changement du positionnement ou si la compaction n'a pas pu être faite efficacement, transmettre l'information à l'ingénierie ;
- Le contremaitre doit valider spatialement l'emplacement de la barricade et valider la qualité de l'écaillage qui doit être minutieusement réalisé pour diminuer les problèmes aux interfaces entre la barricade et le massif rocheux ;
- Présenter et bien expliquer l'importance du respect de la procédure pour l'utilisation de la télécommande lors du début de la construction, question de bien protéger l'opérateur ;
- Lors de la construction, arroser au besoin afin de limiter la poussière, d'aider la compaction et surtout de diminuer les risques pour les opérateurs associés entre autres aux poussières de silice ;
- Appliquer un facteur de sécurité d'au moins 2 pour les barricades qui doivent retenir des colonnes de remblai ayant un pourcentage de liant bas (moins de 5%);
- Des visites (au minimum 2 par chiffre de travail) des barricades qui retiennent le RPC en phase "hydrostatique" sont importantes afin de réduire les risques, surtout si le chantier est remblayé en continu ;

- En définitive, des inspections rigoureuses par du personnel qualifié, avant, pendant et après la construction d'une barricade de stériles permettraient la mitigation des principaux risques de ruptures.

Différentes avenues de recherches pourraient être explorées en lien avec l'étude des chantiers remblayés en contexte minier souterrain, dont voici les principales :

- Étudier la rhéologie et les impacts sur la résistance des barricades rocheuses due à la migration du RPC à l'intérieur des barricades rocheuses de stériles ;
- Explorer plus en détails le drainage du RPC et les impacts sur sa résistance dans un chantier long-trou en fonction de la proximité de chantiers adjacents remblayés et de la séquence d'exploitation minière ;
- Considérer l'analyse des incertitudes sur les pressions mesurées par les capteurs de pressions immergés dans le RPC, valider les formules de calibration des fournisseurs;
- Proposer des abaques modifiés adaptés aux barricades de stériles pour faire varier les valeurs de « R » et de « S ».

CHAPITRE 7 LISTE DES RÉFÉRENCES

Agnico-Eagle, M. (2014). *Aperçu, Mise à jour, Géologie, Réserves, Ressources, Extraction et Traitement à la mine LaRonde, documents techniques disponible en ligne au www.agnicoeagle.com*. Report accessible on line at: www.agnicoeagle.com.

Al-Hassan, A., Katkhuda, I. et Barghouthi, A. (2012). *Narrow backfill lateral earth pressure.* Communications présentées au 5th Jordanian International Civil Engineering Conference, Amman.

Andrews, P., Smith, G. et Butcher, R. (2010). *Pastefill - A Multi-Disciplined Review of Barrick Gold Corporation's Pastefill Operations in Australia.* Communications présentées au AusRock 2014: Third Australian Ground Control in Mining Conference, Sydney.

Archibald, J., De Souza, E. et Beauchamp, L. (2009). *Compilation of industry practices for control of hazards asso-ciated with backfill in underground mines-Part 2 Underground Transport and Stope Placement.* Communications présentées au Metsco Proceedings CIM conferences, Toronto, Canada.

Aubertin, M., Bernier, L. et Bussière, B. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers [ressource électronique]: manuel sur cédérom*: Mont-Royal, Québec: Presses internationales Polytechnique.

Aubertin, M., Li, L., Arnoldi, S., Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M., et al. (2003). Interaction between backfill and rock mass in narrow stopes. *Soil and rock America, 1*, 1157-1164.

Aubertin, M., Li, L., Belem, T. et Simon, R. (2008). *Évaluation des pressions dans les chantiers remblayés et sur les barricades.* Communications présentées au Proceedings of the Symposium Rouyn-Noranda: Mines and the Environment, Rouyn-Noranda, Que.

Aubertin, M., Li, L., Belem, T., Simon, R., Harvey, A., James, M., et al. (2005). *Méthodes d'estimation des pressions induites dans les chantiers remblayés.* Communications présentées au Proceedings of the Symposium Rouyn-Noranda: Mines and the Environment, Rouyn-Noranda, Que.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M., et al. (2002). *Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle.* Communications présentées au Proceedings of Symposium.

Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., et al. (2015). *Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA.* Communications présentées au Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda.

Baldwin, G. et Grice, A. (2000). *Engineering the New Olympic Dam Backfill System.* Communications présentées au AUSIMM annual conference.

Barton, N. (2008). Shear strength of rockfill, interfaces and rock joints, and their points of contact in rock dump design. *Rock dumps. Australian Centre for Geomechanics, Perth*.

Baz-Dresch, J. (1991). Development of high productivity shotcreting at the Cannon Mine. *Mining Engineering*, 647-653.

Belem, T., Aubertin, M., Li, L. et Fall, M. (2009). Développement d'une méthode intégrée d'analyse de stabilité des chantiers miniers remblayés. *Publication de l'IRSST*.

Belem, T. et Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering, 26* (2), 147-174.

Belem, T., Benzaazoua, M. et Bussière, B. (2000). *Mechanical behaviour of cemented paste backfill.* Communications présentées au Proc. of 53rd Candadian Geotechnical Conference, Montreal.

Belem, T., Benzaazoua, M., Bussière, B. et Dagenais, A. (2002). *Effects of settlement and drainage on strength development within mine paste backfill.* Communications présentées au Proceedings of the 9th International Conference, Tailings and Mine Waste.

Belem, T., Benzaazoua, M. et Mbonimpa, M. (2015). Notes de cours (Remblais miniers). Notes de cours inédit. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Belem, T., Harvey, A., Simon, R. et Aubertin, M. (2004). *Measurement and prediction of internal stresses in an underground opening during its filling with cemented fill.* Communications présentées au Proceedings of the fifth international symposium on ground support in mining and underground construction.

Bentz, D. P. (1995). *A three-dimensional cement hydration and microstructure program: I. hydration rate, heat of hydration, and chemical shrinkage*: Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Technology.

Benzaazoua, M. et Belem, T. (2000). *Waste treatment and environemental impact of the mining industry - Optimization of sulfurous paste backfill mixtures for increased long-term strength and durability* (Vol. 1). Santiago, Chile: University of Concepcion.

Benzaazoua, M., Bois, D., Belem, T., Gauthier, P., Ouellet, S., Fall, M., et al. (2005). *Remblais souterrains, évolution des connaissances et de la pratique.* Communications présentées au 20th Colloque Contrôle de terrains.

Berndt, C. C., Rankine, K. J. et Sivakugan, N. (2007). Materials properties of barricade bricks for mining applications. *Geotechnical and Geological Engineering, 25* (4), 449-471.

Blake, W. et Hedley, D. G. (2003). *Rockbursts: case studies from North American hard-rock mines*: SME.

Bloss, M. et Revell, M. (2001). *Mining with Paste Fill at BHP Cannington.* Communications présentées au Minefill 2001.

Brackebush, F. (1994). Basics of paste backfill systems. *Mining Engineering*, 1175-1178.

Brenchley, P. (2010). *Changing the ground support in cemented hydraulic backfill at CSA Mine.* Communications présentées au Second australasian ground control in mining conference, Sydney, NSW.

Broad, E. (2007). *Introduction of and experience gained with cemented hydraulic fill at the Gossan Hill Mine*. Communication présentée au 9th International Symposium on Mining with Backfill Australia.

Cayouette, J. (2003). Optimization of the paste backfill plant at Louvicourt mine. *CIM bulletin, 96* (1075), 51-57.

Collet, K. et van Rooyen, B. (1998). The past, present and future of shotcrete at Elandsrand Gold Mine. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* (May and June 1998), 105-112.

Counter, D. (2014). *Kidd Mine–dealing with the issues of deep and high stress mining–past, present and future* (Vol. Deep Mining 2014). Perth: Australian Centre for Geomechanics.

Counter, D. (2015, 28 and 29 may). *Evidence of mine scale deformation response to stope scale ore extraction, alternate methods to calibrate mine stress/strain models.* Communications présentées au 7th AgnicoEagle/Glencore Ground Control Professional Development Workshop, Mine Kidd, Timmins Ontario.

Currie, R. (1998). *The Preparation of Pastefill and Its Use at Some Canadian Mines.* Communications présentées au Minefill 1998, Brisbane, Australia.

Daigle, L. et Zhao, J. (2003). *Assessing Temperature Effects on Earth Pressure Cells*. Ottawa: National Research Council Canada.

Dawson, S. (1995, 1995-06-26). Audrey cuts ribbon at Bouchard-Hebert mine. *The Northern Miner* Page consultée le 2015-07-14 de http://www.northernminer.com/news/audrey-cuts-ribbon-at-bouchard-hebert-mine/1000094734/?&er=NA.

De Souza, E., Archibald, J. et Beauchamp, L. (2009). *Compilation of industry practices for control of hazards asso-ciated with backfill in underground mines-Part I surface and plant operations*. Communication présentée au ICM Conferences & Exhibitions Papers Toronto.

De Souza, E., Archibald, J. et Dirige, A. (2003). *Economics and perspectives of underground backfill practices in Canadian mines.* Communications présentées au 105th annual general meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, CIM15.

Dehn, K. K., Pakalnis, R. et Corey, G. (2007). *Determining fill fence stability and backfill characteristics during increased backfill rates at an underground hard rock mine*. Communication présentée au Minefill 2007, Montreal.

Deschamps, T. (2009). *Étude du comportement physique et hydrogéochimique d'un dépôt de résidus miniers en pâte dans des conditions de surface= Study of the physical and hydrogeochemical behaviour of surface paste disposal.* Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Doucet, C. (2014). Utilisation du Remblai en Pâte à la mine Goldex. Power point presentation inédit.

Doucet, C. et Harvey, A. (2001). *Utilisation du remblai en pâte dans les mines filoniennes : La Mine Doyon.* Communications présentées au ICM Conference Metsco.

Driscoll, J. (1997). *From Surface to Underground: Carlin East.* Communications présentées au Society for Mining, Metallurgy and ExplorationAnnual Meetings, Denver, Colorado.

Dunnicliff, J. (1993). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field.

Dunnicliff, J. (1997). Temperature sensitivity of earth pressure cells. *Geotechnical News, 15* (2), 42.

Evans, R., Ran, J. et Allan, R. (2007). *Application of Mine Fill at Barrick Gold.* Communications présentées au Minefill 2007, Montreal.

Fall, M., Belem, T., Samb, S. et Benzaazoua, M. (2007). Experimental characterization of the stress–strain behaviour of cemented paste backfill in compression. *Journal of materials science, 42* (11), 3914-3922.

Fortin, R. (2008). *An analysis of barricade containment pressures during the backfill pouring process*. Cambrian College.

Garrett, W. et Campbell Pitt, L. (1958). Tests on an experimental underground bulkhead for high pressures. *J.S. African Institute Mining Metallurgy, October 1958*.

Garrett, W. et Campbell Pitt, L. (1961). Design and Construction of Underground Bulkhead and Water Barriers. *J.S. African Institute Mining Metallurgy*.

Gericke, D. (1998). *Designing and Operating Backfill systems on a South African gold mine.* Communications présentées au Minefill 1998.

Gibson, R. (1958). The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time. *Geotechnique, 8* (4), 171-182.

Giroux, V. (2015). *Programme en contrôle de terrain*. Not published: Mines Agnico-Eagle.

Grabinsky, M. et Bawden, W. (2007). *In situ measurements for geomechanical design of cemented paste backfill systems.* Communications présentées au Proceedings of the 9th International Symposium in Mining with Backfill, Montréal, Que.

Grabinsky, M., Thompson, B., Bawden, W. et Zurawski, B. (2011). *In Situ Measurements of Paste Backfill Pressure in a narrow, dipping stope*. Communication présentée au 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Canada.

Grice, T. (1998). Underground mining with backfill. *Proceedings of the 2nd Annual Summit-Mine Tailings Disposal Systems*, 234-239.

Gurtunca, G., Toper, A., Squelch, A. et Dlokweni, T. (2001). Rock Engineering Criteria for Backfill in Ultra-Deep Level Mining Environments. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration*, 12.

Hadjigeorgiou, J. et Charette, F. (2009). *Guide pratique du soutènement minier* (2ième ed.). Bibliothèque nationale du Québec.

Hallbom, D. (2007). *The operating range method for backfill hydraulics.* Communications présentées au Minefill 2007, Montréal, Qc.

Harteis, S. et Dolinar, D. (2006). Water and slurry bulkheads in underground coal mines: design, monitoring and safety concerns. *Mining Engineering, 58* (12), 41-47.

Harvey, A. (2004). *Étude comparative des contraintes triaxiales dans le remblai en pâte selon la portée des chantiers.*

Hasan, A., Suazo, G., Doherty, J. P. et Fourie, A. (2014). *In-stope measurements at two Western Australian mines.* Communications présentées au 17th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Vancouver, Canada.

Hassani, F. et Archibald, J. (1998). Mine backfill. *CIM, CD-ROM*.

Hassani, F., Fotoohi, K. et Doucet, C. (1998). Instrumentation and backfill performance in a narrow vein gold mine (Vol. 35, pp. 392-392): Pergamon.

Hassani, F., Ouellet, J. et Servant, S. (2001). *In Situ Measurements in a Paste Backfill: Backfill and Rock Mass Response in the Context of Rockburst*. Communication présentée au 17e International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET2001, Turkey.

Helinski, M., Fahey, F. et Fourie, A. (2007). Numerical modelling of cemented paste backfill deposition. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE, 13* (10), 1308-1319.

Helinski, M., Fahey, M. et Fourie, A. (2010). Behavior of cemented paste backfill in two mine stopes: Measurements and modeling. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 137* (2), 171-182.

Helinski, M., Fourie, A. et Fahey, M. (2006). *Mechanics of early age cemented paste backfill.* Communications présentées au Proceedings of the 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Paste.

Helinski, M. et Grice, A. (2007). *Water table management in Hydraulic fill masses*. Communication présentée au Minefill 2007, Montréal.

Hoek, E. (1988). *The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update.* Communications présentées au Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.

Hoek, E. (2009). Fundamentals of slope design. *Keynote address at Slope Stability*, 9-11.

Hoek, E. et Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. London: Instn Min. Metall.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. et Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac, 1*, 267-273.

Hoek, E., Wood, D. et Shah, S. (1992). *A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses.* Communications présentées au Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock.

Hua, C., Acker, P. et Ehrlacher, A. (1995). Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste: I. Modelling at macroscopic scale. *Cement and Concrete Research, 25* (7), 1457-1468.

Hudson, J. A., Brown, E. T., Fairhurst, C. et Hoek, E. (1993). Design of Pressure Tunnels and Shafts. Dans C. Fairhurst (Éd.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Pratices and Projects* (Vol. 2, pp. 349-369): Pergamon Press.

Hughes, P., Pakalnis, R., Hitch, M. et Corey, G. (2010). Composite paste barricade performance at Goldcorp Inc. Red Lake Mine, Ontario, Canada. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24* (2), 138-150.

Hughes, P. B. (2008). *Performance of paste fill fences at Red Lake Mine.* University of British Columbia.

Hughes, P. B. (2014). *Design guidelines: underhand cut and fill cemented paste backfill sill beams.* University of British Columbia.

Isagon, I., Razavi, M. et Townend, S. (2011). *Backfill Practice at Copper Cliff North Mine (CCNM)*. Communication présentée au Innovations in Rock Engineering - In Mines without Borders, Montreal.

Janssen, Z. (1895). Experiments on corn pressure in silo cells. *Verein Deutscher Ingenieure – the Association of German Engineers*, 7.

Johnson, D. B. et Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the total environment, 338* (1), 3-14.

Jundis, R. et Evans, R. (2013). *Nevada's First Paste Backfill Plant.* Communications présentées au CIM conference, Toronto.

Jung, S. et Biswas, K. (2002). Review of current high density paste fill and its technology. *Mineral Resources Engineering, 11* (02), 165-182.

Kalsi, H. (1994). Underground water bulkhead construction at Pamour No. 1 mine. *CIM BULLETIN*, 49-49.

Kirkwood, D. T. et Wu, K. K. (1995). Technical considerations for the design and construction of mine seals to withstand hydraulic heads in underground mines. *Preprints-society of mining engineers of AIME*.

Koenders, E. et Van Breugel, K. (1997). Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research, 27* (10), 1489-1499.

Kuganathan, K. (2002). *A Method to design efficient mine backfill drainage systems to improve safety and stability of backfill bulkheads and fills.* Communications présentées au Underground Operators' Conference, Townsville, Qld.

Kuganathan, K. et Neindorf, L. (2005). *Backfill Technology Development at Xstrata Mount Iza Mines Between 1995 and 2005.* Communications présentées au Proceed. ings 9th AuslMM Underground Operators Conference. PerLh.

Lang, B. (1999). *Permanent Sealing of Tunnels to Retain Tailings or Acid Rock Drainage.* Communications présentées au Congress of the International Mine Water Association, Sevilla.

Langevin, F. (2015). Goldex - Mining at low cost. Power point presentation inédit. Agnico Eagle.

le Roux, K., Bawden, W. F. et Grabinsky, M. F. (2005). Field properties of cemented paste backfill at the Golden Giant mine. *Mining Technology, 114* (2), 65-80.

Lee, C. (2015). *Paste backfill system implementation from concept design through to operation.* Communications présentées au Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda.

Lee, D.-S., Kim, K.-Y., Oh, G.-D. et Jeong, S.-S. (2009). Shear characteristics of coarse aggregates sourced from quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46* (1), 210-218.

Li, L. (2013a). A new concept of backfill design—Application of wick drains in backfilled stopes. *International Journal of Mining Science and Technology, 23* (5), 763-770.

Li, L. (2013b). A simple solution to assess pore-water pressure in barricades made of waste rock. *CIM Journal: Underground Mining, Vol. 4* (No. 1), 53-60.

Li, L. et Aubertin, M. (2009a). Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part I: Fully drained conditions. *Canadian Geotechnical Journal, 46* (1), 37-46.

Li, L. et Aubertin, M. (2009b). Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part II: Submerged conditions. *Canadian Geotechnical Journal, 46* (1), 47-56.

Li, L. et Aubertin, M. (2009c). Numerical investigation of the stress state in inclined backfilled stopes. *International Journal of Geomechanics, 9* (2), 52-62.

Li, L. et Aubertin, M. (2011a). Limit equilibrium analysis for the design of backfilled stope barricades made of waste rock. *Canadian Geotechnical Journal, 48* (11), 1713-1728.

Li, L. et Aubertin, M. (2011b). *Numerical and Analytical Solutions for the Pore Water Pressures Within Barricades Made of Waste Rocks*. Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Li, L., Ouellet, S. et Aubertin, M. (2009). *A method to evaluate the size of backfilled stope barricades made of waste rock*. Communication présentée au Geo Halifax 2009, Halifax.

Linero, S., Palma, C. et Apablaza, R. (2007). *Geotechnical Characterization of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing.* Communications présentées au Proceedings of International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering.

Maerz, N. (1998). *Aggregate sizing and shape determination using digital image processing.* Communications présentées au Center For Aggregates Research (ICAR) Sixth Annual Symposium Proceedings.

Maerz, N. (1999). *Online fragmentation analysis: Achievements in the mining industry.* Communications présentées au Center For Aggregates Research (ICAR) 7th Annual Symposium Texas, USA.

Maerz, N. H., Palangio, T. C. et Franklin, J. A. (1996). *WipFrag image based granulometry system.* Communications présentées au Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada.

Marcinyshyn, K., Pakalnis, R., Dunbar, S. et Vongpasial, S. (1997). *Sill Mat Design.* Communications présentées au CIM Annual General Meeting, Edmonton, Alberta.

Marston, A. (1930). *The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments.* Communications présentées au Highway Research Board Proceedings.

Mbonimpa, M. (2014). Notes de cours - Géotechnique minière. inédit. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

McCarthy, D. F. (1977). *Essentials of soil mechanics and foundations*: Reston Publishing Company.

Mercier-Langevin, F. (2011). LaRonde Extension-mine design at three kilometres. *Mining Technology, 120* (2), 95-104.

Mercier-Langevin, F. et Hadjigeorgiou, J. (2011). Towards a better understanding of squeezing potential in hard rock mines. *Mining Technology, 120* (1), 36-44.

Mercier-Langevin, F. et Hudyma, M. (2007). *The development and implementation of a comprehensive seismic risk management plan at Agnico-Eagle's LaRonde Mine.* Communications présentées au 4th International Seminar on Deep and high stress mining.

Mercier-Langevin, F. et Turcotte, P. (2007). *Evolution of ground support practices at Agnico Eagle's LaRonde Division: innovative solutions to high stress yielding ground.* Communications présentées au 1st Canada–US rock mechanics symposium.

Mitchell, R. et Roettger, J. (1984). Bulkhead pressure measurements in model fill pours. *CIM BULLETIN, 77* (868), 50-54.

Mitchell, R., Smith, J. et Libby, D. (1975). Bulkhead pressures due to cemented hydraulic mine backfills. *Canadian Geotechnical Journal, 12* (3), 362-371.

Mitchell, R. J., Olsen, R. S. et Smith, J. D. (1982). Model studies on cemented tailings used in mine backfill. *Canadian geotechnical journal, 19* (1), 14-28.

Moerman, A., Rogers, K., Cooper, M. et Michael, L. (2001). *Operating and Technical Issues in the Implementation of Paste Backfill at the Brunswick Mine.* Communications présentées au Minefill 2001: Proceedings of the 7th International Symposium on Mining with Backfill

Nisbet, B. M. (2003). *Review of Paste Backfill Fences*. AMEC Project No. B638A: Internal report.

Nortje, S., Mentjies, M., Joughin, W. et Petho, S. (2007). *Design of Hydraulic Backfill Bulkheads at South Deep Gold Mine*. Communication présentée au 9th International Symposium on Mining with Backfill, Montréal.

Ormann, L., Zardari, M. A., Mattsson, H., Bjelkevik, A. et Knutsson, S. (2013). Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on an upstream tailings dam. *Canadian Geotechnical Journal, 50* (4), 391-399.

Ouellet, S. (2015). *Comparison of three paste backfill distribution systems.* Communications présentées au Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda.

Pakalnis, R., Roworth, M., Caceres, C., Martin, L., Seymour, J. et Lourence, P. (2010). *Ground support methodology employing shotcrete for underground mines.* Communications présentées au SME Annual Meeting, Phoenix, AZ.

Palangio, T. C. et Franklin, J. A. (1996). *Practical guidelines for lighting and photography.* Communications présentées au Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada.

Paterson, A., Cooke, R. et Gericke, D. (1998). *Design of Hydraulic Backfill Distribution Systems-Lessons From Case studies.* Communications présentées au Minefill 1998: The Sixth International Symposium on Mining with Backfill, Brisbane, Australia.

Piché, A., Liu, Q., Tran, H. et van Hijfte, L. (2000). Drilling and blasting research at the Noranda Technology Centre. *CIM bulletin, 93* (1039), 38-44.

Planeta, S. et Szymanski, J. (2010). Analyse technique et économique du triage photométrique du minerai. *CIM journal: Mines de métaux, 1* (1), 27-33.

Powers, T. C. et Brownyard, T. L. (1946). *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste.* Communications présentées au ACI Journal Proceedings.

Ras, D., Smart, R., Harrison, A. et Van Blommestein, G. (2007). *High Strength Aerated Cement Bulkheads for Target Gold Mine, South Africa.* Communications présentées au Minefill 2007, Montreal.

Revell, M. et Sainsbury, D. (2007a). *Advancing paste fill bulkhead design using numerical modeling.* Communications présentées au International Symposium of MineFill07. Montreal.

Revell, M. et Sainsbury, D. (2007b). *Paste bulkhead failures.* Communications présentées au Proceedings of the 9th International Symposium on Mining with Backfill (Minefill'07), Montréal, Que.

Sellers, B. (2000). Temperature Effects on Earth Pressure and Concrete Stress Cells Some Theoretical Considerations. *GEOTECHNICAL NEWS-VANCOUVER-, 18* (1), 23-24.

Seneviratne, N., Fahey, M., Newson, T. et Fujiyasu, Y. (1996). Numerical modelling of consolidation and evaporation of slurried mine tailings. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 20* (9), 647-671.

Seymour, J., Martin, L., Clark, C., Tesarik, D. et Stepan, M. (2013, Feb. 24 - 27). *An Analysis Of Recent MSHA Accident Datafor Underground Metal Mines Using Backfill.* Communications présentées au SME Annual Meeting, Denver, Colorado.

Sgaoula, J. (2001). *Backfill optimization and in-house shotcrete production at the Cluff Lake Mine*. CIM publications 2001.

Simms, P. et Grabinsky, M. (2009). Direct measurement of matric suction in triaxial tests on early-age cemented paste backfill. *Canadian Geotechnical Journal, 46* (1), 93-101.

Sivakugan, N., Rankine, K. et Rankine, R. (2006). Permeability of hydraulic fills and barricade bricks. *Geotechnical & Geological Engineering, 24* (3), 661-673.

Sivakugan, N., Rankine, R., Rankine, K. et Rankine, K. (2006). Geotechnical considerations in mine backfilling in Australia. *Journal of Cleaner Production, 14* (12), 1168-1175.

Skeeles. (1998). *Design of Paste Backfill Plant and Distribution System for the Cannington Project.* Communications présentées au Minefill 1998, Brisbane, Australia.

Smith, J. D. et Mitchell, R. (1982). Design and control of large hydraulic backfill pours. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 19* (6), 102–111.

Soderberg, R. L. et Busch, R. A. (1985). *Bulkheads and drains for high sandfill stopes* (Vol. 8959): US Department of the Interior, Bureau of Mines.

Spearing, A. et Milette, D. (2001). *Practical Design Considerations when Planning a Backfill Operation.* Communications présentées au Minefill 2001: Proceedings of the 7th International Symposium on Mining with Backfill.

Sperl, M. (2006). Experiments on corn pressure in silo cells–translation and comment of Janssen's paper from 1895. *Granular Matter, 8* (2), 59-65.

Sveinson, S. (1999). *Characterisation of Tailings for Paste Backfill System Design.* University of British Columbia.

Sylvestre, È.-L. (2014). *Rapport d'essais sur carottes CAN/CSA-A23.2-14C*.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics* (Vol. 18): Wiley New York.

Tesarik, D., Seymour, J., Williams, T., Martin, L. et Jones, F. (2006). *Temperature Corrections to Earth Pressure Cells embedded in Cemtented Backfill*: National Institute for Occupational Safety and Health.

Thibault, R. (2015). L'expérience au service de la revue de littérature. Dans L.-P. Gélinas (Éd.). Réunion interne, mines Agnico Eagle, division LaRonde: Non-publié.

Thompson, B., Bawden, W. et Grabinsky, M. (2011). In situ monitoring of cemented paste backfill pressure to increase backfilling efficiency. *Canadian Institute of Mining Journal, 2* (4), 1-10.

Thompson, B., Bawden, W. et Grabinsky, M. (2012). In situ measurements of cemented paste backfill at the Cayeli Mine. *Canadian Geotechnical Journal, 49* (7), 755-772.

Thompson, B., Bawden, W., Isagon, I. et Grabinsky, M. (2013). *Increasing paste and hydraulic backfilling efficiency through instrumentation*. Communication présentée au World Mining Congress, Montréal.

Thompson, B. D., Grabinsky, M., Bawden, W. et Counter, D. (2009). *In Situ measurements of cemented paste backfill in long-hole stopes.* Communications présentées au ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto.

Turcotte, P., Goulet, C. et Larouche, P. (2013). Fuite de la barricade lors du remblayage du chantier 194-21-47 (pp. 2).

Waterland, J. (1973). *Hydraulic Backfilling at Homestake.* Communications présentées au Jubilee Symposium on mine filling, Mount Isa, North West Queensland Branch.

Watson, D. et Keskimaki, K. (1992). Shotcreting. concreting at Climax Molybdenum's Henderson Mine. *Mining Engineering* (November 1992), 1330-1332.

Williams, T., Denton, D., Larson, M., Rains, R., Seymour, J. et Tesarik, D. (2001). *Geomechanics of Reinforced Cemented Backfill in an Underground Stope at the Lucky Friday M ine, M ullan, Idaho*. United States of America: Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health.

Wilson, W. et Longo, S. (2007). Paste rock. *Canadian Mining Journal, Future for mine waste management?* (October 2007), 4.

Windsor, C. et Thompson, A. (1999). The design of shotcrete linings for excavations created by drill and blast methods. Dans Balkema (Éd.), *Rock support and reinforcement practice in mining* (pp. 231-244). Rotterdam.

WipWare. (2015). *Sampling and Analysis Guide*. North Bay, document that can be downloaded online.

Xiao, Y., Liu, H., Zhang, W., Liu, H., Yin, F. et Wang, Y. (2015). Testing and modeling of rockfill materials: A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (11 September 2015), 10.

Yang, P., Brochu-Baekelmans, M., Li, L. et Aubertin, M. (2014). *An improved solution for sizing barricades made of waste rock to retain cemented paste backfill*. Communication présentée au Geo Regina 2014, Regina.

Yang, P. et Li, L. (2015). *Continuous backfilling of cemented paste backfill Yes, it's possible with wick drains.* Communications présentées au CIM 2015 Convention, Montreal.

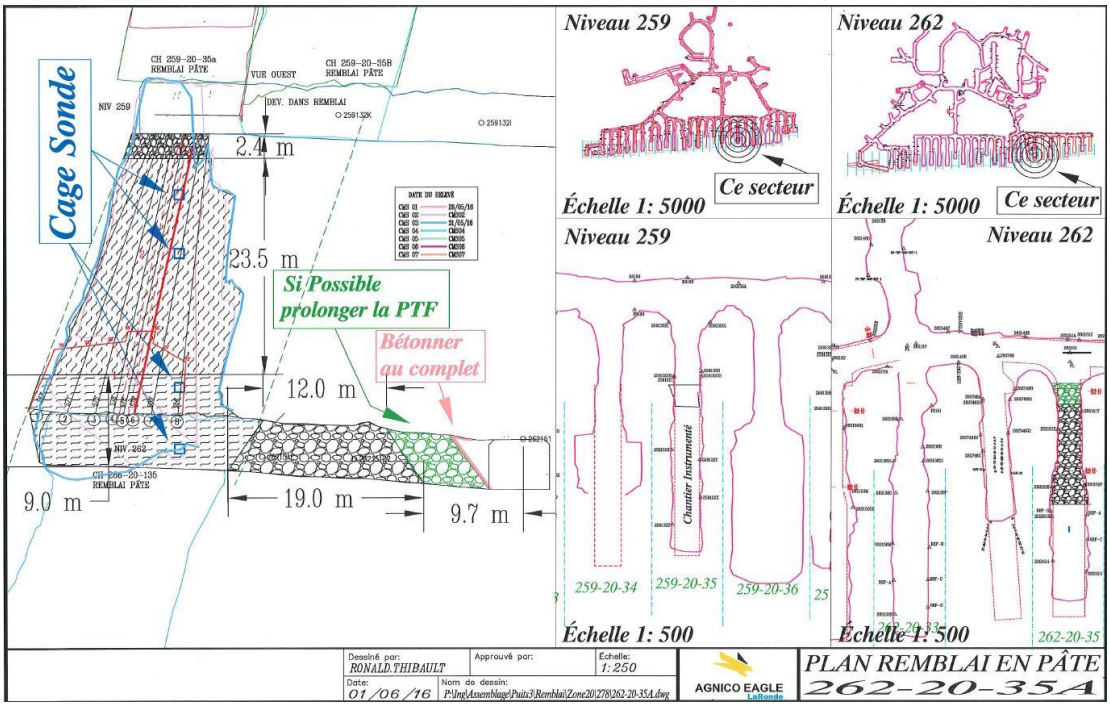
Yumlu, M. (2008). Barricade pressure monitoring in paste backfill. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi (journal), 24* (Zeszyt 4/3), 12.

Yumlu, M. et Guresci, M. (2007). *Paste backfill bulkhead monitoring—a case study from Inmet's Cayeli mine, Turkey.* Communications présentées au Proceedings of the 9th International Symposium in Mining with Backfill, Montréal, Que.

Zhu, Z. (2002). *Analysis of Mine Backfill Behaviour and Stability.* McGill University, Montreal, Canada.

ANNEXES

Annexe A – Plan du chantier 262-20-35A



Plan et devis du chantier instrumenté, à noter que le positionnement des cages sur le plan est approximatif.

ANNEXE B – Fiche d'inspection proposée d'une barricade de stériles

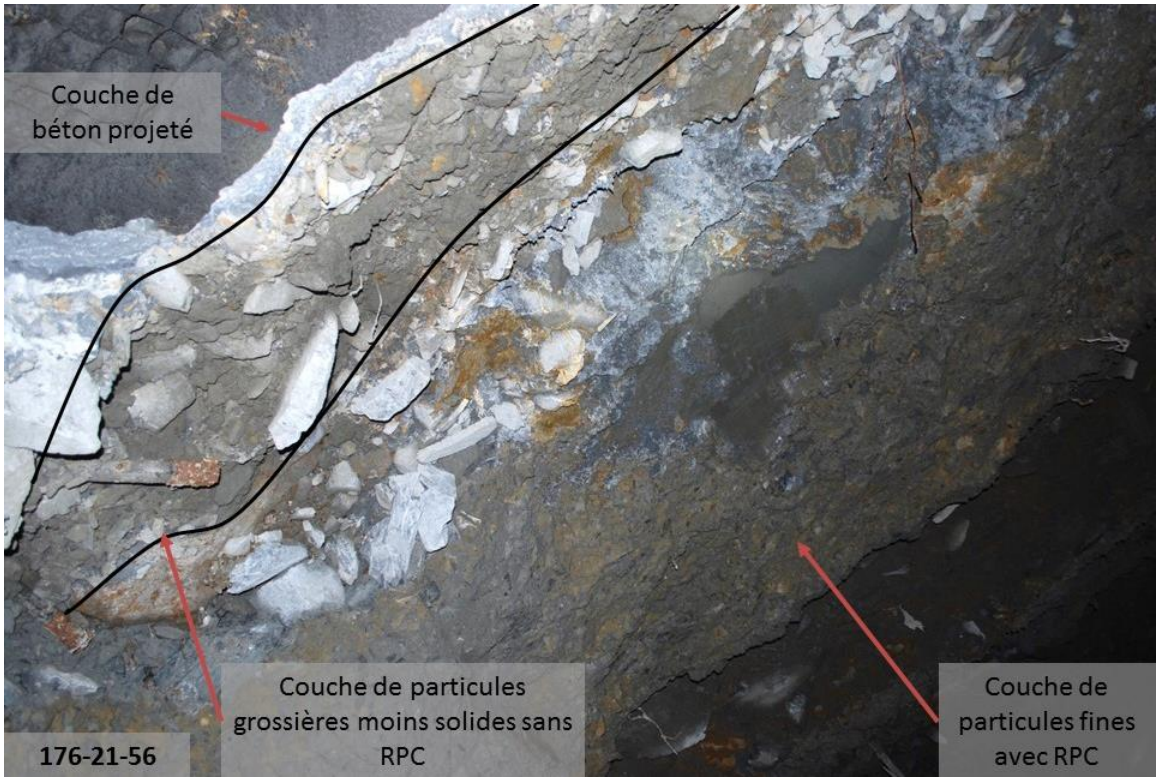
Conformité de devis de barricades #PS:		Conforme	Non-conforme	Commentaires
Position initiale	Emplacement adéquat de la barricade du côté amont (i.e. environ 3.5 m ou 12 pi de l'épaulement)			
	Toit en bon état (aucune fracturation majeure, grillage non chargé)			
	Vérification de l'intégrité des PS adjacents (possibilité de fuites par d'autres PS)			
État de galerie et matériel	Aucune tuyauterie au back (*pipe* de pulpe, *pipe* à remblai, *pipe* à air, *pipe* à eau ou *fan pipe*) qui pourrait nuire au compactage avec la *push plate*			
	Le matériel utilisé est sans débris (support de terrain, boiseries, autres déchets grossiers)			
	Aucun matériel trop fins (uniquement de la *muck* de développement, pas de boue de forage)			
	Aucune roche grossière (uniquement de la muck de développement, pas de bloc qui ont cavés ou morceaux de murs tombés)			
	Aucun bloc de remblai en pâte n'a été utilisé (peu importe le diamètre)			
	Aucun problème lors du compactage à l'aide de la push-plate			
Béton projeté	Aucun grillage au toit qui pourrait nuire à la projection de béton			
	Bourrage de béton d'au moins 7 cm (3 po) d'épais (plus d'un voyage de camion si nécessaire)			
	Béton projeté sur au moins 1.5 m (5 pi) au toit			
	Béton projeté sur au moins 1.5 m (5 pi) de la partie supérieure de la barricade			
	Le béton projeté rempli complètement l'espace entre le grillage et le toit			
	Les murs sont couverts sur au moins 1m (3 pi) à partir de l'enrochement			
	Cure de 12h du béton projeté respecté			Heure fin de projection _____:_____
Position finale	Enrochement de confinement d'au moins 3m (10 pi) de hauteur et à au moins 3m (10 pi) de la barricade (≈ 8 godets de 8 verges)			
	Affichage présent pour s'assurer qu'il n'y aura aucun emprunt de roches avant une cure minimal du chantier			

Autres commentaires:

ANNEXE C – Développement à travers le RPC

Photo montrant très bien la quantité de blocs tombés à travers le RPC près de l'épaulement d'un chantier remblayé. Dans le bas d'un chantier remblayé au RPC, surtout dans certains chantiers instables, on a presque du remblai mixte pâte-rocheux. À noter que ce chantier n'a pas été délibérément remblayé avec RPC et remblai rocheux comme dans certaines circonstances. La photo a été prise par l'auteur.

ANNEXE D - Développement à travers le RPC



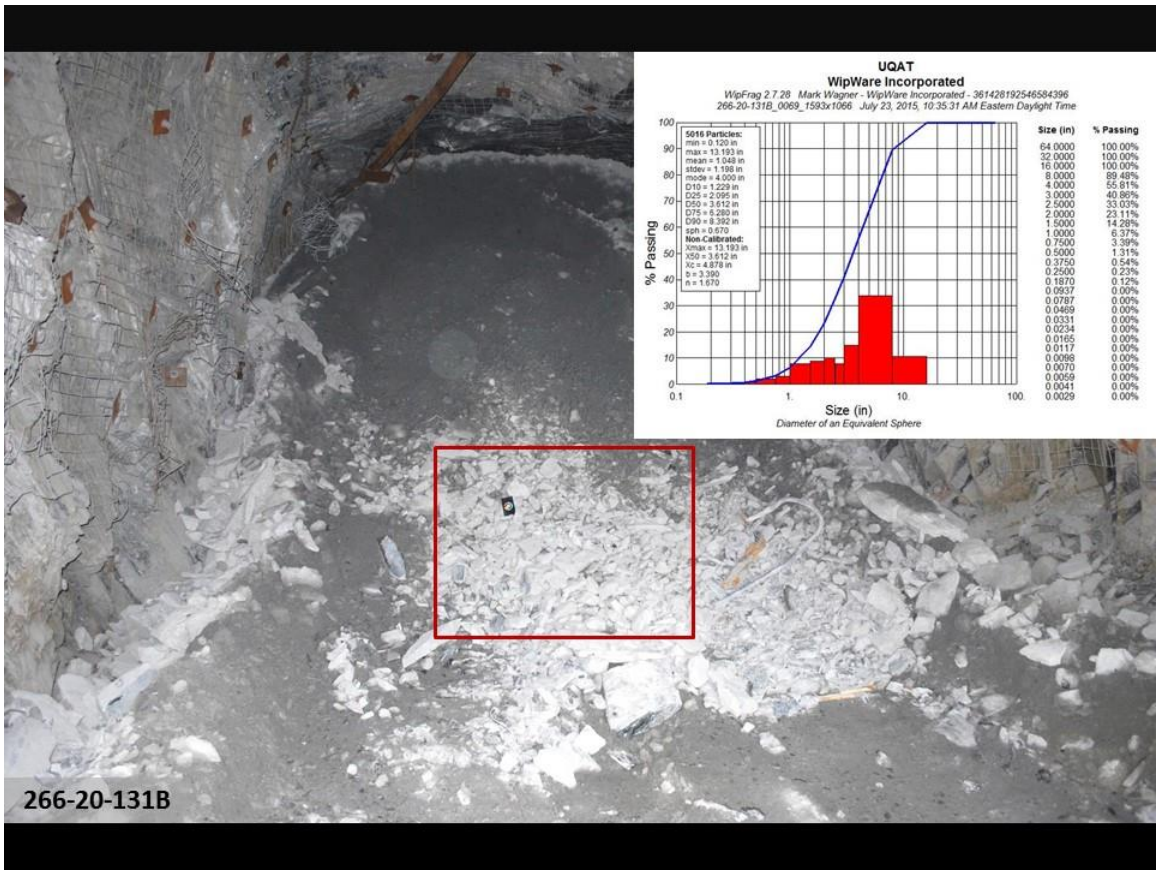
Il est possible d'apprécier avec ces photos la possibilité de développer à travers une

ancienne barricade de stériles. Il faut noter la difficulté pour nettoyer le mur du contact du béton projeté (ancien côté aval de la barricade) sur la première photo qui démontre à quel point le béton projeté permet de bien étanchéifier l'interface barricade-galerie. Sur la deuxième photo, on voit très bien les délimitations d'interface dans une barricade de stériles havés de la mine LaRonde. Les photos ont été prises par l'auteur.

ANNEXE E – Plaque de poussée

Il existe différentes variantes de la plaque de poussée, appelée dans le milieu minier une « push-plate », mais en voici un modèle standard de la mine LaRonde. Le godet de la chargeuse-navette, appelé « scoop » s'insère à l'arrière. La longueur et la largeur peuvent varier principalement en fonction de la dimension des galeries de la mine où la plaque de poussée est utilisée. La photo a été prise par l'auteur.

ANNEXE F – Analyse WipFrag avec une photo de barricade de stériles



Ce cas précis de prise de photos permettait de voir même sans analyse par image, le ganoclassement de la barricade de stérile du chantier 266-20-131B. La photo ici présentée n’est pas celle utilisé pour l’analyse par image. En effet, cette photo ne respecte pas la procédure établie et présentée à la section : 3.2.1 Procédure de prises de photos pour l’analyse granulométrique.

ANNEXE G – Étapes de la modélisation FLAC 3D

Construction de la géométrie

Dimensions de la galerie, longueur de la barricade au toit, angles de la barricade en amont et aval, distance entre épaulement et la barricade, dimensions du chantier/encaissant et la densité de maille.

```
xD    = 16.          ; coordonnées en mètres en X du coin supérieur (mur Est, côté amont)
yD    = 0.           ; coordonnées en mètres en Y du coin supérieur (mur Est, côté amont)
zD    = 4.5          ; coordonnées en mètres en Z du coin supérieur (mur Est, côté amont)
alpha = 52.*degrad     ; angle de la barricade en côté amont en degrés
phi   = 43.*degrad     ; angle de la barricade en côté aval en degrées
L     = 4.           ; longueur de la barricade au toit en m
R     = 25.          ; hauteur en m d'encaissant au-dessus et en-dessous de la galerie en z
W     = 20.          ; largeur en m d'encaissant de chaque côté en y
h     = 5.0          ; hauteur de la galerie en m
g     = 5.0          ; largeur de la galerie en m
D     = 6.           ; distance entre l'épaulement et le sommet de la barricade
nL    = 9.           ; nombre de maille au toît de la barricade 4*g
nh    = 9.           ; nombre de maille sur la hauteur de la barricade 4*w
nd    = 9.           ; nombre de maille dans la galerie sur la longueur
…
xO0 = xD+L+(h/(tan(phi)))
xO1 = xD+L+(h/(tan(phi)))
xO2 = xD+L+(h/(tan(phi)))
xO3 = xD+L+(h/(tan(phi)))
yO0 = -1.*W
yO1 = 0.
yO2 = g/2.
yO3 = g+W
zO0 = -1.*R
zO1 = -1.*R
zO2 = -1.*R
```

```
zO3 = -1.*R

...

;SECTION MAILLES

sx1 = int(nd*(xD/L))

sx2 = int(nd)

sx3 = int(nd/4)

sx4 = int(nd*2)

sy1 = int(nL*(W/g))

sy2 = int(nL)

sy3 = int(nL*2)

sy4 = int(nL/4)

sz1 = int(nh*(R/h))

sz2 = int(nh)

;sz3 = int(nh)

;SECTION RATIO

r0 = 0.93

r1 = 1.

r2 = 1.07

command

;bloc 1 et colonne 1 - ENCAISSANT

generate zone brick  p0 (@xB0,@yB0,@zB0) p1 (@xD0,@yD0,@zD0) p2 (@xB1,@yB1,@zB1) p3 (@xI0,@yI0,@zI0) &  p4 (@xD1,@yD1,@zD1) p5 (@xI1,@yI1,@zI1) p6 (@xJ0,@yJ0,@zJ0) p7 (@xJ1,@yJ1,@zJ1) &  group encaissant &  size @sx1 @sy1 @sz1 &  ratio @r0  @r0  @r2)

…

;bloc 5 et colonne 2 - c'est la BARRICADE

generate zone brick  p0 (@xC1,@yC1,@zC1) p1 (@xF1,@yF1,@zF1) p2 (@xC2,@yC2,@zC2) p3 (@xD1,@yD1,@zD1) & p4 (@xF2,@yF2,@zF2) p5 (@xD2,@yD2,@zD2) p6 (@xE1,@yE1,@zE1) p7 (@xE2,@yE2,@zE2) & group barricade & size @sx1 @sy2 @sz2 & ratio @r1  @r1  @r1

…

;bloc 2 extension - ENCAISSANT - contour du chantier MUR OUEST

generate zone brick p0 (@xCC0,@yCC0,@zCC0) p1 (@xCC1,@yCC1,@zCC1) p2 (@xG0,@yG0,@zG0) p3 (@xBB0,@yBB0,@zBB0) & p4 (@xGext,@yGext,@zGext) p5 (@xH0,@yH0,@zH0) p6 (@xBB1,@yBB1,@zBB1) p7 (@xHext,@yHext,@zHext) & group encaissant &  size @sx1 @sy2 @sz2 &  ratio @r1  @r1  @r1
```

Définir les propriétés des blocs et les conditions limites

- Module de Young, module de Poisson et de la masse volumique ;
- Les propriétés de la barricade, de l'encaissant, de l'air et du RPC sont entrés dans le modèle.

```
def prop
e_  = 39.82e+09            ;Module de Young   encaissant stérile    programme
p_  = 0.23                 ;Module de Poisson encaissant stérile
d_  = 2250                 ;Masse volumique   encaissant basalte
sh_  = e_  / (2*(1+p_))
b_  = e_  / (3*(1-2*p_))
e2_  = 0.3e+09             ;Module de Young RPC              Li, Li
p2_  = 0.2                 ;Module de Poisson RPC
d2_  = 2188                ;Masse volumique RPC
s2h_  = e_  / (2*(1+p_))
b2_  = e_  / (3*(1-2*p_))
e3_  = 0.57e+09            ;Module de Young barricade                  Yaya
p3_  = 0.334               ;Module de Poisson barricade
d3_  = 1810                ;Masse volumique barricade
s3h_  = e_  / (2*(1+p_))
b3_  = e_  / (3*(1-2*p_))
command
ini density @d_
model mech elastic
prop dens @d_   shear @sh_    bulk @b_    range group encaissant
prop dens @d2_  shear @s2h_   bulk @b2_   range group RPC
prop dens @d3_  shear @s3h_   bulk @b3_   range group barricade
model mech null range group air
model mech null range group RPC
model mech null range group barricade
end_command
end
```

```
@prop
;pa
```

Création d'un modèle élastique

FLAC calcule les tenseurs de contraintes de cisaillement de chacun des blocs.

- On applique la gravité et 5000 itérations pour vérification de convergence ;
- Remise des déplacements à zéro, on rajoute la barricade, nouvelle série d'itérations ;
- Vérification avec un test de pressions (homogène) dans le chantier ;
- Les déplacements sont remis à zéro avec la dernière ronde de 10 000 itérations pour calculer les déplacements dans la barricade avec un gradient de pression hydro-géostatique dans le chantier;
- Différents scénarios sont calculés en faisant varier les dimensions et les propriétés.

```
def cond
xcond  =  xD+D+L+cc
ycond1 =  g/2
ycond2 =  -1*w
ycond3 =  -1*w+ww
zcond1 =  -1*R
zcond2 =  R+h
command
fix x range x=0                  ; bleu
fix x range x=@xcond  z  @zcond1 0      ; bleu
fix x range x=@xcond  y  @ycond2 @ycond3  ; bleu
fix y range y=@ycond1              ; vert
fix y range y=@ycond2              ; vert
fix z range z=@zcond1              ; rouge
end_command
end
@cond
```

```
;pause
set gravity 0,0,-9.8
;points de déplacements
def displa
aa=(xD+L/2)
bb=h+R
cc=(xD+L)
dd=(g/2)
ee=(h/2)
command
hist add gp xdisp @aa, 0, @bb
hist add gp xdisp @aa, 0, @h
hist add gp xdisp @xD, 0, 0
end_command
end
@displa
model mech elas range group barricade
prop dens @d3_  shear @s3h_   bulk @b3_   range group barricade
fix y range y=@ycond1
ini dis 0,0,0
hist add gp xdisp @aa, 0, @bb
hist add gp xdisp @aa, 0, @h
hist add gp xdisp @xD, 0, 0
apply nstress -526750 gradient 0,0,21500 range x @xD @xcond  z 0 @zcond2
cyc 10000
list gp disp range x=@xD y =@dd z=@h
list gp disp range x=@aa y =@dd z=@h
list gp disp range x=@cc y =@dd z=@h
list gp disp range x=@aa y =@dd z 0 @h
save LRD_D5_varG_5.sav
;pause
```