



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

Faculté de Génie

Département de génie civil

VALORISATION DES RÉSIDUS MINIERS ET DES  
ROCHES STÉRILES CONCASSÉES COMME DE  
MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie civil

Rabeb Janadi

Jury :

Patrice RIVARD (Directeur)

Tikou BELEM (Codirecteur)

Mathieu Robert (Rapporteur)

Mamert Mbonimpa (Correcteur externe)

## Résumé

L'exploitation minière génère une grande quantité de déchets solides nommés les stériles et les rejets de concentrateurs (résidus miniers). Le stockage de ces rejets s'effectue en surface dans des parcs à résidus. À leurs expositions aux intempéries, des réactions d'oxydations se manifestent qui donnent naissance au drainage minier acide (DMA). L'optique de la gestion des rejets miniers consiste à remplacer les matériaux conventionnels des formulations cimentaires. Cette méthode de valorisation permettrait l'industrie minière de réduire à la fois les impacts environnementaux de stockage des rejets en surface et aussi bien les frais de taxation. Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre de la gestion écologique des rejets miniers solides qui représentent une source de contamination de l'environnement et qui n'ont pas aucune valeur économique. Il vise à développer des formulations de bétons et mortiers en remplaçant entièrement le sable et les granulats respectivement par des résidus miniers fins de cinq mines au Québec (LaRonde, Malartic, Casa Berardi, Westwood et Goldex) et des roches stériles concassées de la mine Malartic.

Suite à une caractérisation minéralogique (DRX) et physique (granulométrique) des résidus ainsi qu'à une caractérisation par l'application de l'essai de double poinçonnement et de Micro Deval des roches stériles concassées, plusieurs mélanges de bétons et mortiers ont été réalisés en variant la source des rejets miniers incorporés. Des essais de laboratoire tels que l'essai de compression uniaxiale, impulsion ultrasonore et résistivité électrique ont été appliqués sur des cylindres de béton à 28 et 56 jours de cure et seulement l'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur des cubes de mortiers à 7, 14, et 28 jours de cure. Les résultats de cette étude montrent que le remplacement total du sable conventionnel par des résidus miniers et des granulats par des roches stériles concassées dans des formulations de bétons et mortiers a donné des bonnes résistances mécaniques. Les UCS mesurés des bétons à base de matériaux miniers sont de 15,4 MPa, 21,5 MPa, 25,7 MPa, 22,1 MPa et 26,3 MPa respectivement pour les mélanges Westwood, Casa Berardi, LaRonde, Malartic et Goldex à 56 jours de durcissement. Des observations microscopiques (MEB) des bétons Goldex, Westwood et le témoin a montré que la microstructure de la matrice cimentaire change en variant la source des résidus incorporés. Cette variation des résultats est affectée par la minéralogie et la granulométrie de chaque type de résidus utilisés.

**Mots clés :** Valorisation - résidus miniers - roches stériles - béton – mortier - formulation – résistance mécanique - microstructure

## **ABSTRACT**

Mining operations generate a large amount of solid waste called waste rock and mill tailings. These wastes are stored on the surface in tailings ponds. When exposed to the weather, oxidation reactions occur, resulting in acid mine drainage (AMD). The objective of mine waste management is to replace conventional materials in cement formulations. This method of recovery allows the mining industry to reduce both the environmental impacts of storing the waste on the surface as well as the taxation costs. This research project is part of the ecological management of solid mine waste which represents a source of environmental contamination and which has no economic value. It aims to develop concrete and mortar formulations by replacing sand and aggregates respectively with fine mine tailings from five mines in Quebec (LaRonde, Malartic, Casa Berardi, Westwood and Goldex) and crushed waste rock from the Malartic mine.

Following a mineralogical (XRD) and physical (particle size) characterization of the tailings as well as a characterization by the application of the double punching test and Micro Deval test of the crushed waste rock, several concrete and mortar mixes were produced by varying the source of the incorporated mine waste. Laboratory tests such as uniaxial compression test, ultrasonic pulse and electrical resistivity were applied on concrete cylinders at 28 and 56 days of cure and only the uniaxial compression test was performed on mortar cubes at 7, 14, and 28 days of cure. The results of this study show that the total replacement of conventional sand by mine tailings and of aggregates by crushed waste rock in concrete and mortar formulations gave good mechanical strengths. The measured UCS of the mine material based concretes are 15.4 MPa, 21.5 MPa, 25.7 MPa, 22.1 MPa and 26.3 MPa respectively for Westwood, Casa Berardi, LaRonde, Malartic and Goldex mixes at 56 days of curing. Microscopic observations (SEM) of the Goldex, Westwood and control concretes showed that the microstructure of the cementitious matrix changes with variation in the source of the incorporated residues. This variation in results is affected by the mineralogy and particle size of each type of tailings used.

**Key words :** Valorisation - mine tailings - waste rock - concrete - mortar - formulation - mechanical strength - microstructure

## Remerciement

*Tout d'abord je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Patrice Rivard pour m'avoir donné la chance de réaliser ce projet de recherche au sein de son Laboratoire à l'Université de Sherbrooke. Aussi, je tiens à remercier mon codirecteur de recherche, le professeur Tikou Belem. Merci beaucoup de m'avoir soutenue et encouragée.*

*Je voudrais remercier également tout le personnel de notre groupe de recherche : Chouaib, Oumayma, Jean-Christophe, Danick... etc*

*Je tiens à remercier l'organisme MITACS Globalink de m'avoir offert cette opportunité de poursuivre mes études au Québec.*

*Des remerciements spéciaux à mes colocataires Ameni et Sabah, à mes amis Mariem, Salma et Karim... vous étiez ma petite famille au Canada. Également, un gros merci à Chiraz pour tout le support et l'aide. Je remercie aussi mes amis Nouhe, Mona, Nour, Ons, Wiem, Cyrine, Hichem... mes cousins et mes cousines... mes grandes mères et mes oncles pour le soutien moral.*

*À la fin, je veux dire merci aux personnes les plus chères au monde : mes parents Rawdha et Hichem, ma sœur Rania, mon beau-frère Maher et mes neveux Mahdi et Yassine. Des remerciements spéciaux sont consacrés à mon cher partenaire Firas, merci de m'avoir tenu compagnie, malgré la distance, tu étais toujours là... Je ne trouve pas les mots pour vous dire à quel point je vous aime, à quel point vous m'encouragez chaque jour.*

*Merci à ceux qui m'ont aidé à réussir mon projet de recherche...*

# Table des matières

Liste des figures.....	VIII
Listes des tableaux.....	X
1 Chapitre 1.....	1
INTRODUCTION .....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Objectifs et hypothèses de recherche .....	3
1.3 Structure du mémoire.....	4
2 Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
2.1 Les rejets miniers solides .....	5
2.2 Gestion intégrée des rejets miniers .....	6
2.3 Caractéristiques des résidus miniers .....	7
2.4 Méthodes de valorisation des résidus miniers.....	8
2.4.1 Restauration d'une aire d'accumulation ou d'une fosse .....	9
2.4.2 Fabrication des remblais miniers cimentés.....	9
2.4.3 Fabrication de matériaux de construction .....	10
2.5 Méthodes de valorisation des roches stériles .....	15
2.5.1 Mélange roches stériles concassées/remblai en pâte cimenté .....	15
2.5.2 Remblai rocheux cimenté .....	17
2.6 Hydratation de la pâte de ciment hydraté.....	17
2.6.1 Mécanisme de la réaction d'hydratation .....	17
2.6.2 Hydratation des produits cimentaires incorporant des résidus miniers.....	19
2.7 Récapitulatif.....	20
3 Chapitre 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES.....	21
3.1 Programme expérimental.....	21
3.2 Démarches expérimentales.....	23
3.2.1 Caractérisation des résidus miniers .....	23
3.2.2 Caractérisation des roches stériles concassées.....	23
3.2.3 Fabrication du mortier .....	25
3.2.3.1 Conditionnement et conservation des résidus miniers.....	25

3.2.3.2	Optimisation et préparation des mélanges de mortiers.....	25
3.2.4	Fabrication du béton .....	28
3.2.4.1	Préparation des roches stériles .....	28
3.2.4.2	Optimisation des mélanges en remplaçant le sable par des résidus miniers et les granulats par des roches stériles concassées .....	29
3.2.4.3	Préparation des mélanges de béton .....	30
3.2.5	Essais effectués sur des échantillons de béton et de mortier .....	32
3.2.5.1	Essais non destructifs : résistivité électrique et impulsion ultrasonique.....	32
3.2.5.2	Essais destructifs (essai de compression uniaxiale et essai Brésilien).....	33
3.2.5.3	Observations au microscope électronique à balayages (MEB) .....	35
4	Chapitre 4 RÉSULTATS ET LEUR ANALYSE.....	37
4.1	Essais de caractérisation des résidus miniers et des roches stériles.....	37
4.1.1	Analyse granulométrique .....	37
4.1.2	Minéralogie.....	40
4.1.3	Essai de double poinçonnement (résistance à la compression) .....	42
4.1.4	Essai Micro-Deval.....	43
4.2	Résistance à la compression uniaxiale des mortiers.....	43
4.3	Essais réalisés sur le béton .....	46
4.3.1	État frais .....	46
4.3.2	État durci.....	47
4.3.2.1	Essais non destructifs .....	47
4.3.2.2	Propriétés mécaniques .....	50
4.3.2.3	Résultats des observations au microscope électronique à balayage MEB.....	56
5	Chapitre 5 DISCUSSION DES RESULTATS .....	63
5.2	Effet d'augmentation du rapport E/C sur la résistance à la compression des mortiers incorporant des résidus miniers .....	64
5.3	Relation entre la résistance à la compression et l'affaissement du béton .....	65
5.4	Effet de l'incorporation des rejets miniers sur les propriétés élastiques du béton.....	67
5.5	Effet de remplacement du sable par les résidus et les granulats par les roches stériles concassées sur la microstructure .....	68
5.6	Intérêt économique et environnemental .....	69

6 Chapitre 6..... 70  
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS ..... 70  
Références ..... 73

## Liste des figures

Figure 2-1 : Les étapes d'exploitation d'une mine (modifié du MDDEP, 2015).....	6
Figure 2-2 : Modes de recyclage des rejets miniers : (a) gestion des rejets miniers ; (b) évolution des quantités des résidus recyclés au Canada (modifié de l'INRP, 2015).....	7
Figure 2-3: Évolution des quantités des résidus miniers (modifié du MDDEP, 2015) .....	8
Figure 2-4: Résistance à la compression du béton (Belem et al. 2010).....	12
Figure 2-5: Résistance à la compression du mortier (Belem et al. 2010) .....	12
Figure 2-6: Résistance à la compression du remblai en pâte cimenté (Belem et al. 2010).....	12
Figure 2-7 : Oxydation superficielle du mortier composite (Belem et al. 2010).....	12
Figure 2-8 : Résistance à la compression des mortiers (Argane et al. 2015).....	13
Figure 2-9: Variables influençant les propriétés des matrices cimentaires incorporant des résidus minier (d'après Argane et al., 2015) .....	14
Figure 2-10: Étapes de concassage des roches stériles provenant de la mine LaRonde (d'après Hane et al., 2017) .....	17
Figure 2-11 : Observation au microscopique électronique à balayage (MEB) des composants d'hydratation du ciment (Tagnit-Hamou, 2013).....	19
Figure 3-1: Diagramme du programme expérimental .....	22
Figure 3-2: Essai de double poinçonnement sur des échantillons de roche de forme irrégulière	24
Figure 3-3 : Essai Micro-Deval sur les roches stériles concassées .....	24
Figure 3-4: Résidus humides (à gauche) et résidus séchés (à droite).....	25
Figure 3-5: Formulation des paramètres des mélanges de mortier .....	26
Figure 3-6 : Confection des cubes de mortier : moules cubiques (gauche) et cubes (droite).....	27
Figure 3-7 : Sable fin utilisé dans la formulation des mélanges témoins .....	27
Figure 3-8 : Préparation des roches stériles concassées : tamisage (à gauche) et lavage (à droite) .....	29
Figure 3-9 : Confection des cylindres de béton, dosage des ingrédients (à gauche) et préparation des cylindres et du malaxeur (à droite) .....	31
Figure 3-10 : Essai d'affaissement au cône Abrams.....	32
Figure 3-11 : Cylindres de béton coulés .....	32
Figure 3-12 : Essai de résistivité (à gauche) et essai d'impulsion ultrasonique (à droite).....	33
Figure 3-13 : Essai de compression uniaxiale sur un cube de mortier (à gauche), sur un cylindre de béton (au milieu) et essai de coefficient de poisson et module de Young (à droite).....	34
Figure 3-14 : Détermination de la résistance à la traction indirecte (Brésilien) sur des cylindres de béton .....	34
Figure 3-15 : Préparation des échantillons de béton, métallisation des échantillons et Microscope électronique à balayage (MEB) .....	36
Figure 4-1 : Courbes granulométriques des résidus miniers .....	39

Figure 4-2: Courbe granulométrique du sable de référence .....	40
Figure 4-6 : Variation de la résistance à la compression estimée en fonction de l'échantillon de roche testé.....	42
Figure 4-4 : Variation de la résistance à la compression des mortiers à base des résidus miniers .....	44
Figure 4-5 : Cubes de mortier oxydés .....	46
Figure 4-9 : Consistance très fluide (à gauche), fluide (au milieu) et plastique (à droite).....	47
Figure 4-7 : Variation des valeurs des essais non destructifs .....	49
Figure 4-11 : Variation de la résistance à la compression (UCS).....	51
Figure 4-12 : Variation de la résistance à la traction.....	52
Figure 4-13 : Variation du ratio UCS/Rt en fonction du temps de durcissement .....	53
Figure 4-11 : Variation du module d'élasticité en fonction de résidus incorporés dans le béton.....	54
Figure 4-12 : Variation du coefficient de Poisson en fonction des résidus incorporés.....	55
Figure 4-13: Images MEB de la microstructure du mélange Témoin à l'âge de 28 jours .....	58
Figure 4-14 : Images d'analyses EDS des aiguilles d'ettringite du mélange Témoin .....	58
Figure 4-15 : Images MEB de la microstructure du mélange Goldex à l'âge de 28 jours de durcissement.....	59
Figure 4-16 : Images d'analyses EDS des aiguilles d'ettringite (a) et du gel d'hydratation C-S-H (b) du mélange Goldex.....	60
Figure 4-17 : Images MEB de la microstructure du mélange Westwood à l'âge de 28 jours de durcissement.....	61
Figure 4-18 : Images d'analyses EDS d'une particule de muscovite (a), des plaques de portlandite (b) et des aiguilles d'ettringite (c) du mélange Westwood.....	62
Figure 5-1 : Relation entre les résistances à la compression et l'augmentation du rapport E/C des mortiers.....	65
Figure 5-2 : Relation entre la résistance à la compression et l'affaissement du béton.....	66
Figure 5-3 : Relation entre le module d'élasticité (E) et la vitesse d'impulsion ultrasonique .....	68

## Listes des tableaux

Tableau 2-1: Pourcentage d'incorporation des résidus miniers .....	11
Tableau 2-2 : Résistance à la compression des mélanges de béton en variant le taux de remplacement et la classe granulométrique des stériles concassés et des résidus (tiré de Hane et al., 2017).....	16
Tableau 2-3 : Les paramètres influents sur l'hydratation des béton/Mortier et remblai en pate cimenté (modifié, Benzaazoua et al., 2004).....	19
Tableau 3-1 : Teneur en eau pondérale des résidus miniers après leur séchage à l'air libre.....	25
Tableau 3-2: Formulation du mortier.....	26
Tableau 3-3 : Composition chimique du ciment GU .....	28
Tableau 3-4: Formulation du béton .....	29
Tableau 3-5 : Ages des échantillons de béton testés.....	35
Tableau 4-1: Paramètres granulométriques usuels des résidus miniers.....	38
Tableau 4-2 : Minéralogie des résidus miniers .....	41
Tableau 4-3 : Résultats de l'essai Micro-Deval.....	43
Tableau 4-4 : Variation des résistances à la compression moyenne des mortiers par rapport au témoin .....	44
Tableau 4-5 : Variation des pourcentages d'augmentation des résistances à la compression des cubes de mortiers du mélange M1 (E/C=0.8) par rapport M2 (E/C=1.3) à 28 jours.....	45
Tableau 4-6 : Résultats du test d'affaissement au cône Abrams.....	47
Tableau 4-7 : Pourcentage de variation des paramètres des essais non destructifs par rapport au témoin .....	49
Tableau 4-8 : Ecart d'évolution des résultats des essais non destructifs en fonction du temps de durcissement.....	50
Tableau 4-9 : Pourcentage de variation des résistances mécaniques par rapport au témoin .....	52
Tableau 4-10 : Pourcentage de variation des paramètres mécaniques (module d'élasticité et coefficient de Poisson) par rapport au témoin .....	55
Tableau 5-1 : Comparaison de quelques caractéristiques minéralogiques et granulométriques sur la variation des résistances à la compression et l'affaissement .....	67

# Chapitre 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte et problématique

L'industrie minière au Canada génère près de 800 millions de tonnes/année de rejets miniers solides lors des opérations d'exploitation des gisements de minerais (Lapointe, 2020). Ces rejets sont composés principalement de résidus miniers et de roches stériles et contiennent souvent des sulfures métalliques, des métaux lourds tels que le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) et/ou des métalloïdes tels que l'arsenic (As). Les sulfures métalliques pourraient générer de la pollution environnementale via le drainage minier acide (DMA), tandis que du drainage neutre contaminé (DNC) peut être généré en présence des métaux lourds et métalloïdes (ex. Aubertin et al., 2001). De plus, les compagnies minières doivent déclarer annuellement l'élimination des résidus miniers et des stériles à l'Inventaire national des rejets de polluants (INRP) (Environnement et changement climatique Canada, 2020). En 2013, le Québec modifiait le Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel pour pouvoir taxer chaque tonne de rejets miniers solides entreposés en surface (MDDELCC, 2015). Par conséquent, la réutilisation des rejets miniers solides serait très avantageuse puisque les tonnes de rejets valorisés ne seront pas taxées par les paliers gouvernementaux (provincial et fédéral). Cette vision de valorisation est devenue une priorité pour l'industrie minière, non seulement pour des raisons environnementales, mais aussi pour les frais associés à la pénalisation. Il devient alors très avantageux de pouvoir valoriser au maximum ces rejets solides soit par leur retraitement pour extraction secondaire, ou par leur réutilisation comme matériaux de remblayage souterrain. Les remblais miniers sont faits à base des rejets solides avec ajout ou non d'un agent liant pour créer un matériau cimentaire répondant aux besoins de stabilité des terrains (Belem & Benzaazoua, 2008). La valorisation des rejets solides semble être une solution qui favorise la réduction à la fois des coûts de traitement et/ou des taxations ainsi que des impacts environnementaux associés à leur stockage, surtout en surface.

En effet, la gestion des rejets miniers solides se fait majoritairement en surface où ils sont exposés aux intempéries (ex. air et humidité naturelle) ; ce qui peut engendrer la génération de DMA à la suite de l'oxydation des sulfures (Aubertin et al., 2002 ; Benzaazoua et al., 2002). Quant au DNC, il est généré dans certaines conditions spécifiques où le pH est proche de la neutralité et que les eaux de drainage contiennent des métaux lourds et des métalloïdes (Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Sb, Co, As, etc.) et plusieurs autres contaminants (Mayes et al., 2009 ; Plante, 2010).

Dans le contexte québécois, l'industrie minière doit gérer ses rejets miniers solides selon plusieurs facteurs tout en respectant les lignes directrices édictées par le ministère de l'environnement du Québec (MDDELCC, 2015). Lorsque le minerai est exploité en souterrain par la méthode chambres remblayées, le remblayage permet de retourner près de la moitié des résidus miniers sous terre sous forme de remblai en pâte cimenté (RPC) et de réutiliser une bonne partie des roches stériles sous forme de remblai rocheux cimenté. Ceci a comme avantage d'apporter à la fois du support secondaire des terrains tout en favorisant la réduction des impacts environnementaux liés à l'entreposage des rejets miniers solides en surface (Aubertin et al., 2002 ; Belem & Benzaazoua, 2008).

Vu les quantités importantes de rejets miniers solides générés chaque année, il est impératif pour la société de trouver des voies de valorisation efficaces afin de les réutiliser au maximum pour d'autres applications industrielles (génie des mines, génie civil, etc.). Dans le cas du génie civil, ces rejets solides pourraient être réutilisés comme matériaux de construction (ex. bâtiments et infrastructures routières). Toutefois, du fait de leur composition minéralogique et chimique très variée, il est très difficile d'anticiper la performance de ces matériaux lorsqu'ils sont utilisés en remplacement des matériaux de construction traditionnels.

Ce projet de recherche s'inscrit donc dans une démarche de valorisation des rejets miniers solides dans le contexte de développement durable et dans la perspective de la réduction, voire de l'épuisement, des ressources naturelles non renouvelables dans le secteur des matériaux de construction, sans oublier les retombées sur la réduction des taxes associées à l'entreposage et au confinement des rejets solides dans des aires d'accumulation. Par conséquent, les rejets miniers solides pourraient constituer une source de matières premières secondaire pour les

travaux de génie civil et de génie des mines. En effet, il s'agira d'évaluer le comportement des résidus miniers provenant de cinq mines au Québec (Goldex, Canadian Malartic, Casa Berardi, LaRonde et Westwood) et des roches stériles provenant de la mine Canadian Malartic, incorporés dans des mélanges cimentaires.

## 1.2 Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'étudier la faisabilité de valorisation des rejets miniers comme matériaux de construction usuels en les incorporant dans une matrice cimentaire. Il s'agira d'optimiser des formulations de béton et de mortier dans lesquelles le sable et les granulats grossiers seront remplacés respectivement par les résidus miniers fins et les roches stériles concassées. Ceci se fera via la caractérisation en laboratoire des propriétés physiques et mécaniques du béton et du mortier. Les objectifs spécifiques de ce projet sont :

- Caractériser les résidus échantillonnés auprès de cinq mines de la région d'Abitibi-Témiscamingue : Goldex, Canadian Malartic, Casa Berardi, LaRonde et Westwood et des roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic ;
- Remplacer à 100% les matériaux de construction standards par des matériaux miniers ;
- Étudier l'impact du type de rejets miniers (granulométrie, minéralogie, etc.) sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons et mortiers fabriqués ;
- Analyser le développement des réactions entre les composants d'hydratations du ciment et les microparticules des résidus miniers à l'aide de la microscopie électronique à balayage ;

Dans le cadre de ce projet de recherche, les hypothèses suivantes seront énoncées :

- La forte variabilité des propriétés physiques et minéralogiques des rejets solides ne permet pas d'appliquer des formulations standards de béton et mortier ;
- Les caractéristiques physiques et minéralogiques des rejets miniers solides (résidus miniers fins et roches stériles concassées) affecteront négativement les propriétés mécaniques des formulations de mortier et béton résultantes, comparativement à celles des formulations standards ;

- L'impact négatif de la finesse des grains des résidus miniers et de la minéralogie des rejets solides pourrait être atténué en effectuant une sélection adéquate du type de ciment ou d'agent liant afin de maintenir la stabilité chimique des bétons et mortiers à long terme.

### 1.3 Structure du mémoire

Ce mémoire est composé de six chapitres.

- Le chapitre 1 traite de l'introduction générale qui inclut la mise en contexte et la problématique, les objectifs et les hypothèses de recherche.
- Le chapitre 2 présente une revue de l'état de l'art sur les propriétés mécaniques et les avantages environnementaux de la réutilisation des rejets miniers solides dans des formulations de matériaux cimentaires tels que les bétons, les mortiers et certains remblais miniers cimentés.
- Le troisième chapitre présente la méthodologie de recherche incluant la démarche suivie et le programme expérimental des travaux de laboratoire, la caractérisation des matériaux utilisés, les paramètres des formulations des mélanges cimentaires et les essais réalisés.
- Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus des différents essais avec une analyse des effets des propriétés physiques des rejets miniers sur les propriétés mécaniques des mélanges.
- Le cinquième chapitre présente la discussion des résultats obtenus.
- Finalement, le sixième chapitre présente la conclusion et la synthèse sur la valorisation des rejets miniers comme matériaux de construction pour des applications dans le génie civil. Ce chapitre expose aussi les recommandations et les perspectives de cette voie de valorisation.

## Chapitre 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de l'état de l'art sur les propriétés mécaniques et les avantages environnementaux de la réutilisation (valorisation) des rejets miniers solides dans des formulations de matériaux cimentaires tels que les bétons, les mortiers et des remblais miniers cimentés.

#### 2.1 Les rejets miniers solides

Les rejets miniers solides représentent les déchets résultant de l'extraction des gisements de minerai jusqu'à leur traitement pour la séparation des métaux (de base et précieux) (Figure 2-1). À ces rejets solides s'ajoutent également les boues de traitement des eaux minières tel que le drainage minier acide (DMA) :

- Les roches stériles, qui ne contiennent aucune valeur marchande, sont retirées au cours de l'exploitation minière pour pouvoir accéder aux minerais. Ces roches stériles sont entreposées dans des haldes à stériles (fraction granulométrique grossière) ;
- Les résidus miniers (ou rejets de concentrateur) sont issus du traitement minéralurgique (ou de la concentration à l'usine de traitement) du minerai pour en extraire les métaux. Il s'agit de la fraction la plus fine qui est généralement entreposée dans les parcs à résidus miniers ;
- Les boues sont issues du traitement chimique des eaux minières (ex. du DMA). Elles sont généralement stockées dans des bassins de rétention, mais peuvent également être entreposées dans les parcs à résidus, selon leur composition et stabilité chimique.

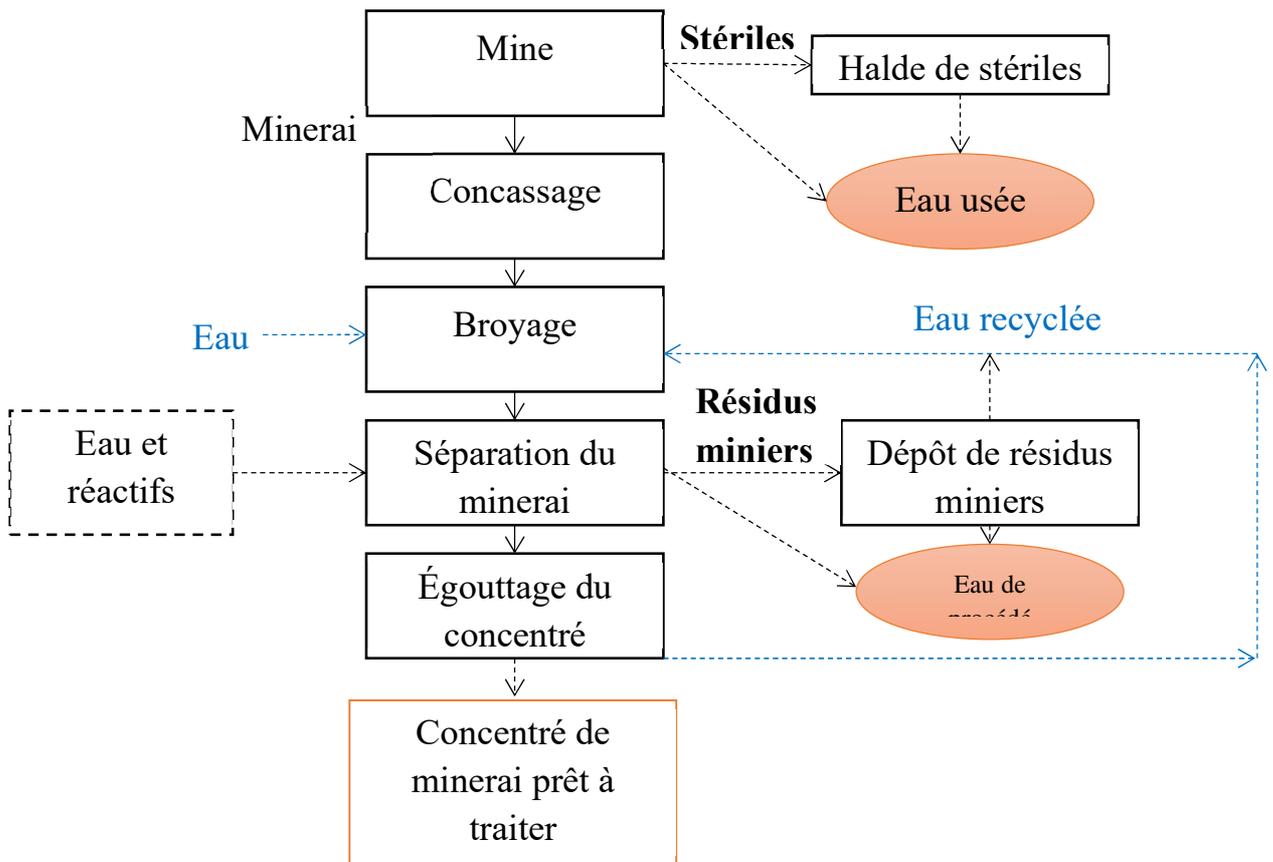


Figure 2-1 : Les étapes d'exploitation d'une mine (modifié du MDDEP, 2015)

## 2.2 Gestion intégrée des rejets miniers

En termes de gestion des rejets miniers, l'année 1990 a été un tournant au Canada par le démarrage du programme de neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier (NEDEM) qui représente un vaste programme de R&D dans le domaine de l'environnement minier. Ce programme a permis de faire avancer significativement les connaissances qui sous-tendent la gestion et la valorisation des rejets miniers et la restauration des sites miniers. Ainsi, les rejets miniers n'étant pas éliminés, ils peuvent être réutilisés ou valorisés pendant et après les activités minières. Tout au long de la durée de vie d'une mine, une bonne partie des rejets miniers est utilisée comme matériau de remblayage des vides souterrains ainsi que pour la construction de chemins miniers et de digues de retenue dans les parcs à résidus (NEDEM, 1990).

Vu les importants tonnages de ces rejets solides générés, il est nécessaire d'appliquer une technique/méthode de gestion économiquement viable et d'établir des stratégies de recyclage et de valorisation de ces derniers afin de les impliquer dans la boucle économique de l'industrie minière (MDDEP, 2009).

Dans ce contexte et selon la composition, les quantités et le potentiel de valorisation, *le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable* encourage l'industrie minière à réutiliser les rejets et de s'en servir comme une source de matière alternative (MDDEP, 2009). En effet, des millions de tonnes de rejets au Canada ont été recyclés dans le secteur minier (Figure 2-2). Cette approche est considérée comme un vecteur de développement durable qui vise la recherche de nouvelles techniques de valorisation des rejets dans le domaine minier.

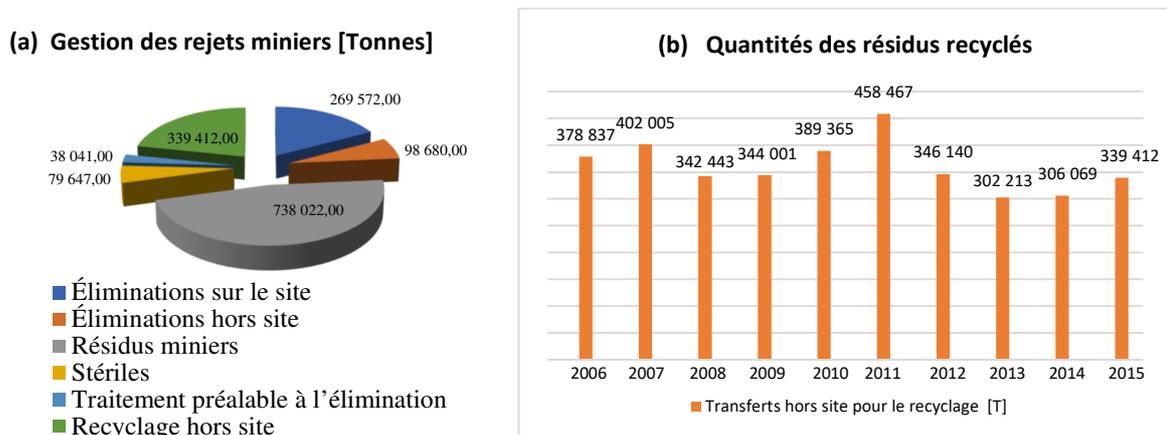


Figure 2-2 : Modes de recyclage des rejets miniers : (a) gestion des rejets miniers ; (b) évolution des quantités des résidus recyclés au Canada (modifié de l'INRP, 2015)

### 2.3 Caractéristiques des résidus miniers

Les résidus miniers désignent des déchets rejetés à l'issue de la transformation des minerais, des concentrés de minerai ou d'autres matériaux miniers, visant à extraire les composants commercialisables tels que les métaux et les minéraux. Ils peuvent inclure des roches finement broyées, du sable, de l'argile, de l'eau, des produits chimiques utilisés dans les procédés et des métaux résiduels et des minéraux (MDDEP, 2015).

De 2006 à 2015, l'exploitation minière a généré des quantités très importantes de résidus miniers qui varient entre 540 000 et 740 000 tonnes (Figure 2-3) (MDDEP, 2015). Les quantités cumulées

de résidus miniers imposent une technique de gestion pour les recycler afin de réduire leurs impacts environnementaux.

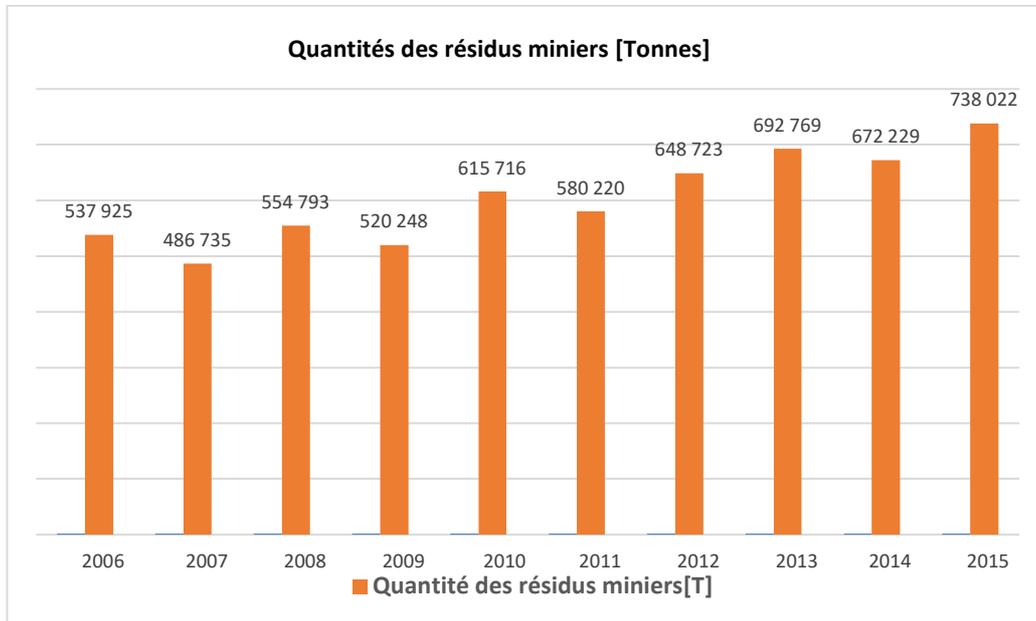


Figure 2-3: Évolution des quantités des résidus miniers (modifié du MDDEP, 2015)

## 2.4 Méthodes de valorisation des résidus miniers

Dans le cadre de l'ingénierie écologique (écologie industrielle), plusieurs méthodes de stabilisation, de solidification, de restauration, de recyclage et de valorisation des déchets ont été développées. En ce qui concerne les résidus miniers, les modes de valorisation reconnus pour le secteur minier sont (MDDEP, 2015 ; Benzaazoua et al., 2006; Ritcey, 2005) :

- Les infrastructures minières : construction de digues de retenue, chemins miniers, assises de bâtiments, etc. ;
- Le remblayage des excavations de mines souterraines et de fosses à ciel ouvert ;
- La restauration de certains parcs à résidus abandonnés et non abandonnés ;
- Les travaux de génie civil.

#### 2.4.1 Restauration d'une aire d'accumulation ou d'une fosse

Une autre méthode de valorisation des résidus miniers reconnue est leur utilisation comme couverture dans le cadre de la restauration des parcs à résidus (MDDEP, 2015). Une telle (multicouches ou monocouches) couverture devra jouer l'effet d'une barrière capillaire recouvrant les nappes phréatiques. Aussi, les résidus miniers peuvent être utilisés pour le remplissage total ou partiel de fosses exploitées à ciel ouvert. Les mines de Mont-Wright, de Troilus et du Lac des îles sont des exemples de mines québécoises qui ont remblayé leurs fosses qui ne sont plus exploitables (BAPE, 2009).

#### 2.4.2 Fabrication des remblais miniers cimentés

L'utilisation des résidus miniers dans la fabrication du remblai en pâte cimenté (RPC) est reconnue comme une méthode efficace de valorisation. En effet, le remblayage consiste à retourner sous terre près de 50% de la quantité des résidus générés (Belem et al., 2004 ; Benzaazoua et al., 2004). C'est la raison pour laquelle ce remblayage est devenu une pratique courante dans les mines souterraines pour combler les chantiers souterrains ouverts pendant l'exploitation. Le remblayage peut ainsi être appliqué pendant et après l'exploitation d'une mine comme méthode de comblement des vides créés. Il existe trois principaux types de remblai minier couramment utilisés dans l'industrie minière : le remblai hydraulique (cimenté ou non), le remblai rocheux (cimenté ou non), et le remblai en pâte cimenté (RPC). Parmi ces trois types, le remblai rocheux cimenté (RRC) et le remblai en pâte cimenté (RPC) sont les plus populaires dans les opérations minières modernes où le ratio liant/résidus secs varie entre 2 et 8% (Belem & Benzaazoua, 2003; Benzaazoua et al., 1999 ; Grice, 1998). Pour les RPC, les résidus miniers sont mélangés avec un liant hydraulique qui est généralement du ciment Portland à usage courant seul (GU) ou mélangé avec du laitier de hauts fourneaux ou Slag (ex. 20% GU et 80% Slag) et de l'eau de mélange afin d'obtenir la pâte de remblai cimenté.

Le remblai minier en pâte est souvent utilisé pour construire des planchers de travail et/ou de roulage d'engins lourds et dans le cas d'un chantier isolé, le remblai a été appliqué pour stocker des rejets. Le remblai minier en pâte peut être utilisé comme support vertical, pilier confiné avec au moins une face exposée dans le cas de la méthode de minage par chantiers primaires et

secondaires. Aussi, il est rarement utilisable pour construire des piliers autoportants à plusieurs faces exposées (ex. Belem, 2009).

En outre, Ouellet et Chouteau (2008) ont étudié la relation entre la résistivité électrique, la résistance mécanique ainsi que la porosité et la saturation en eau des remblais en pâte cimentés. Ces auteurs ont fabriqué des échantillons de remblai en pâte cimenté à partir des résidus de la mine LaRonde, de la mine Doyon et de la mine Sigma. Ces trois résidus étaient riches en sulfures de fer. Les mélanges de remblai en pâte cimenté ont été préparés avec deux proportions de ciment, soit 3% et 6% par rapport à la masse sèche des résidus. Après 120 jours de cure, la détermination de la résistance mécanique et la mesure de la résistivité ont montré un accroissement de la résistance mécanique des échantillons de RPC dans les 28 premiers jours et un ralentissement par la suite (attaque sulfatique). L'effet de la quantité de ciment ajoutée était bien évident, car les résistances mécaniques obtenues en utilisant 6% de ciment sont de l'ordre du double de celles obtenues avec 3% de ciment.

#### 2.4.3 Fabrication de matériaux de construction

Les mélanges de remblais, de mortiers et de bétons composites à base des résidus miniers peuvent être utilisés dans les travaux souterrains et les chantiers de construction, etc. Une certaine résistance mécanique est requise afin de les utiliser adéquatement. Des chercheurs ont démontré que l'incorporation d'un pourcentage de résidus pour remplacer le sable ou le ciment a donné des résultats acceptables. Le Tableau 2-1 présente les pourcentages de remplacement appliqués dans certains travaux de recherche pour la confection des mélanges cimentaires en incorporant de matériaux miniers.

Tableau 2-1: Pourcentage d'incorporation des résidus miniers

Auteurs	Taux de remplacement par des résidus miniers	Mélanges
Belem et al., (2010)	Remplacement de 100% du sable par des résidus	Remblai en pâte cimenté
		Mortier
		Béton
Argane et al. (2015)		Mortier Ze <sup>1</sup> Mortier Mi <sup>1</sup>
Ince (2019)	Remplacement de 10 à 30% du sable par des résidus	Mortier 10% <sup>2</sup> Mortier 20% <sup>2</sup> Mortier 30% <sup>2</sup>
	Remplacement de 10 à 30% du ciment par des résidus miniers	Mortier 10% <sup>2</sup> Mortier 20% <sup>2</sup> Mortier 30% <sup>2</sup>

<sup>1</sup> les noms des mines, Zeida (Zi) et Mibladen (Mi) ; <sup>2</sup> pourcentage de remplacement de sable par des résidus ;

Belem et al. (2010) ont utilisé des résidus miniers sulfurés de la mine LaRonde en remplacement du sable dans des formulations de bétons, de mortiers et de remblais en pâte cimentés en utilisant un ratio eau/ciment (E/C) de 0,5 et en pré-mélangeant deux types de ciment Portland (le type HS et le type GU). Les auteurs ont montré qu'on pouvait fabriquer des matériaux cimentaires, incorporant des résidus miniers sulfureux, ayant des résistances mécaniques acceptables. Par ailleurs, des traces d'oxydation superficielle ont été observées sur les échantillons de mortier et béton incorporant des résidus de LaRonde (Figure 2-7). Cette oxydation a légèrement affecté le développement des résistances. Les bétons et les mortiers composites ainsi produits ont atteint une résistance à la compression de 26 MPa pour le mortier et le béton composites, et 21 MPa pour le remblai en pâte cimenté de type mortier à 28 jours (Figure 2-4, Figure 2-5 et Figure 2-6). La diminution des résistances à la compression du béton et du mortier incorporant des résidus de LaRonde est respectivement de l'ordre de 27 et 16% par rapport au témoin.

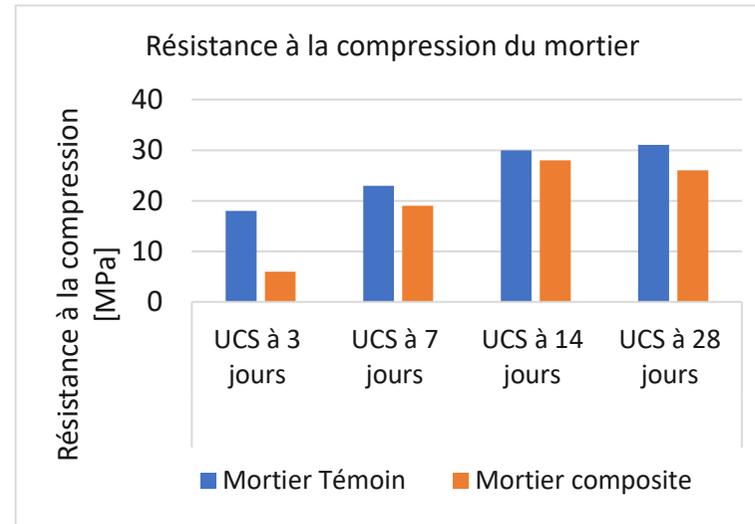
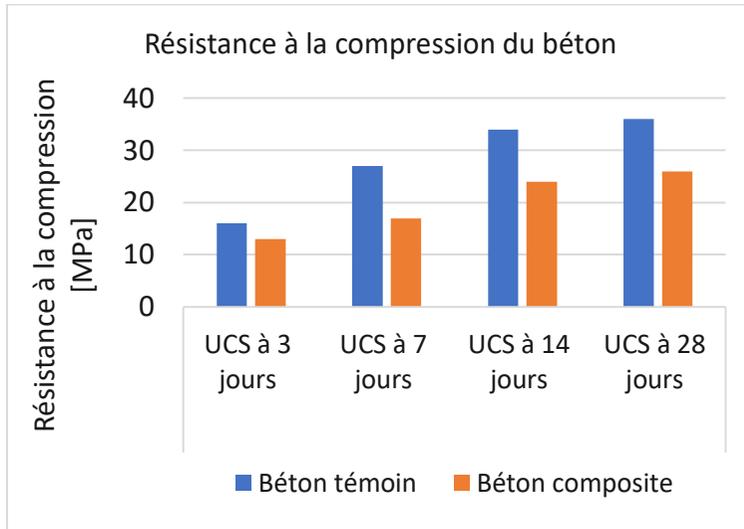


Figure 2-4: Résistance à la compression du béton (Belem et al. 2010) Figure 2-5: Résistance à la compression du mortier (Belem et al. 2010)

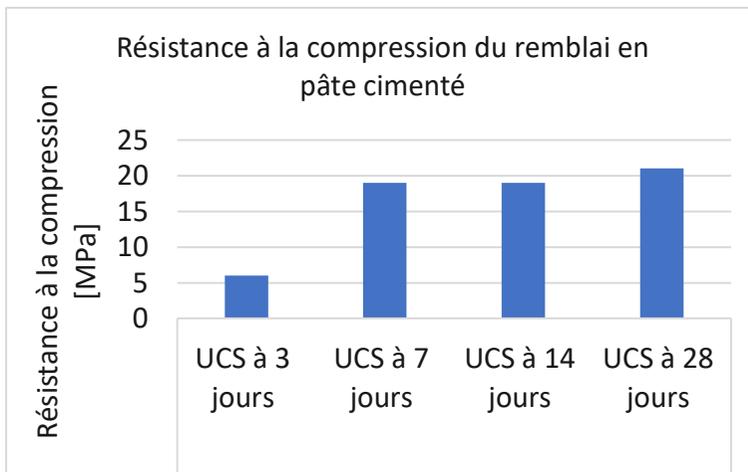


Figure 2-6: Résistance à la compression du remblai en pâte cimenté (Belem et al. 2010)



Figure 2-7 : Oxydation superficielle du mortier composite (Belem et al. 2010)

Argane et al. (2015) ont montré que le remplacement de 100% du sable par des résidus à faible teneur en sulfures (< 2%) de la mine de Zeida et de mine Mibladen (au Maroc) pour la confection des enduits de mortier a donné de bonnes résistances mécaniques. La résistance à la compression uniaxiale testée à 28 jours était respectivement de 8,5 MPa et 10,9 MPa pour le mortier à base des résidus de la mine de Zeida et de la mine Mibladen. Le rapport E/C appliqué pour ces mélanges était de 1,35 (Figure 2-8)

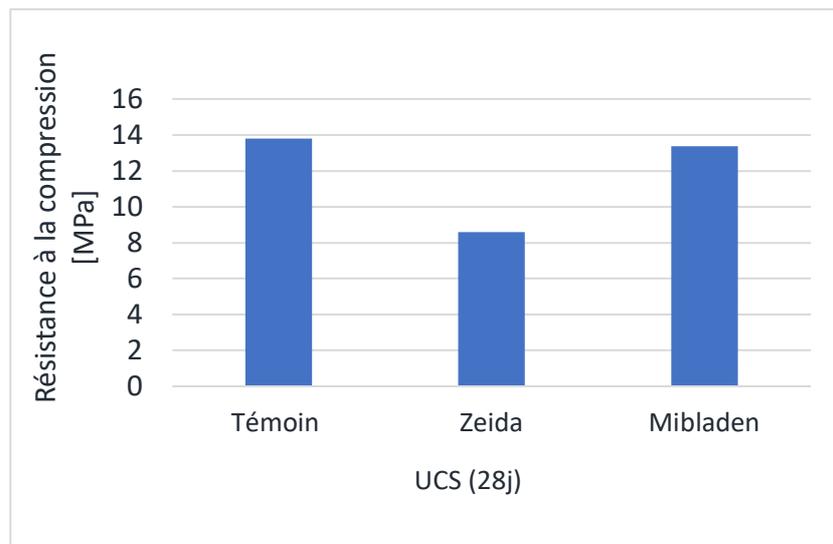


Figure 2-8 : Résistance à la compression des mortiers (Argane et al. 2015)

Les résultats des tests de lixiviation ont montré que les métaux libérés par les mortiers à base de résidus ont une faible concentration. À cet effet, les auteurs ont confirmé que les mortiers à base des résidus miniers faiblement sulfurés possédaient une bonne performance mécanique et une bonne durabilité, et que ce type de valorisation des résidus constituait une alternative durable de gestion de résidus miniers. Aussi, Argane et al. (2015) ont mis en évidence le fait que les propriétés des mortiers incorporant des résidus miniers sont influencées par un certain nombre de variables. Parmi ces variables, celles qui sont les plus pertinentes lorsque des résidus miniers sont réutilisés en remplacement du sable pour la fabrication des mortiers sont :

- La teneur en particules fines (< 20  $\mu\text{m}$ ) : cette propriété semble influencer considérablement la demande effective en eau, la résistance à la compression et la porosité des mortiers résultants.

- La composition minéralogique : la prédominance des carbonates ou silicates (72%) dans les résidus a influencé considérablement leur comportement géochimique et leur capacité de neutralisation.
- La teneur en sulfures : la présence d'une faible teneur (< 2%) en sulfure dans les résidus de métaux de base permet leur réutilisation pour remplacer le sable. Par conséquent, la faible teneur en sulfures réactifs dans les résidus étudiés de la mine de Zeida et Mibladen a permis d'atteindre une bonne stabilité chimique.
- La présence de Pb et Zn dans la solution interstitielle : ces éléments sont responsables du retardement de l'hydratation du ciment qui pourrait résulter par une réduction de la teneur en portlandite et en C-S-H.
- La teneur en métaux : la combinaison des résultats des tests de lixiviation a indiqué que dans le cas de teneurs en métaux résiduels relativement faibles dans les résidus (Cr 60 mg/kg, Pb 4500 mg/kg, Zn 250 mg/kg), les risques de libération de métaux à partir des mortiers à base de résidus sont faibles et leur réutilisation comme enduits de surface peut constituer une méthode de valorisation efficace des résidus étudiés.

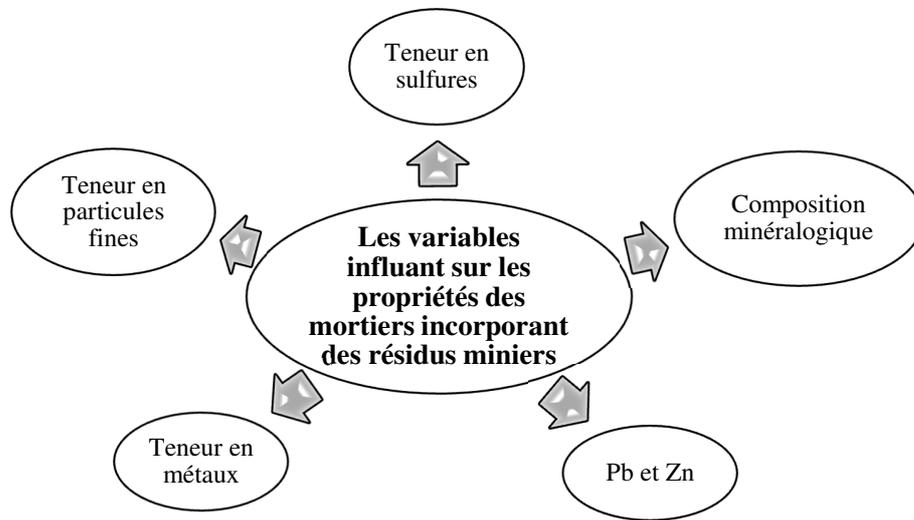


Figure 2-9: Variables influençant les propriétés des matrices cimentaires incorporant des résidus minier (d'après Argane et al., 2015)

## 2.5 Méthodes de valorisation des roches stériles

Les roches stériles représentent les roches issues de l'opération d'extraction des minerais ou le reste de la gangue trop pauvre pour être exploitée. Ces roches stériles peuvent contenir de faibles teneurs en minerai et peuvent aussi inclure plusieurs éléments chimiques (traces de métaux, sulfures, etc.) inexploitable dans la chaîne de production. Les roches stériles sont généralement stockées dans des haldes et la principale préoccupation reliée aux empilements de stériles est leur stabilité physique et chimique et leur pouvoir d'oxydation et de génération du drainage minier acide.

### 2.5.1 Mélange roches stériles concassées/remblai en pâte cimenté

Les remblais mixtes ou composites peuvent être définis comme tout mélange de résidus et/ou de roches stériles avec un liant, de l'eau, et avec ou sans ajout d'autres matériaux comme le sable, les adjuvants, etc. Le premier remblai mixte a été testé à la mine Mount Isa (Leahy & Cowling, 1978) et il était constitué de roches stériles concassées de taille inférieure à 25 mm mélangées avec du remblai hydraulique. Ce type de remblai mixte a été utilisé par la suite dans de nombreuses mines à travers le monde (Arioglu, 1984 ; Farsangi et al., 1996 ; Grice, 1998 ; Annor, 1999 ; Senyur & Erer, 1990 ; Wang & Villaescusa, 2000 ; Kintzel, 2005).

Hane et al. (2017) ont démontré que l'utilisation de roches stériles concassées avec les résidus de la mine LaRonde améliorait les résistances à la compression du remblai mixte cimenté obtenu. La Figure 2-10 présente les principales étapes de traitement de ces derniers avant de les utiliser dans les mélanges. Par ailleurs, ces auteurs ont étudié les caractéristiques physiques et mécaniques des remblais mixtes cimentés contenant différents volumes de roches stériles concassées. Les formulations des mélanges ont été préparées avec trois classes granulométriques des roches stériles concassées à savoir 0/10, 0/15 et 0/20 mm. Le taux de remplacement de roches stériles est de 10, 20, 30, 40 et 50% par rapport au volume. Cette formulation a été comparée par un mélange témoin qui a été préparé sans l'utilisation de ces roches stériles concassées. Les résultats montrent que l'ajout de roches stériles concassées dans les mélanges de remblai en pâte cimenté permettait une augmentation de l'ordre de 60 à 70% de la résistance à la compression après 28

et 90 jours de durcissement. Le mélange le plus résistant était obtenu par l'incorporation de 50% (v/v) de roches stériles concassées de classe 0/15 mm (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Résistance à la compression des mélanges de béton en variant le taux de remplacement et la classe granulométrique des stériles concassés et des résidus (tiré de Hane et al., 2017)

Taux de remplacement [%] (v/v)	Classe granulométrique (mm)	Résistance à la compression [MPa]	
		28 jours	91 jours
10	0/10	2,3	3,0
	0/15	2,4	3,1
	0/20	2,5	3,4
	Témoin	1,5	2,7
20	0/10	2,0	2,9
	0/15	2,55	3,1
	0/20	2,4	3,3
	Témoin	1,5	2,7
30	0/10	2,4	2,9
	0/15	2,7	3,4
	0/20	2,5	3,5
	Témoin	1,5	2,7
40	0/10	2,1	3,3
	0/15	2,8	3,8
	0/20	2,7	3,3
	Témoin	1,5	2,7
50	0/10	2,1	3,1
	0/15	3,0	4,0
	0/20	2,9	3,4
	Témoin	1,5	2,7

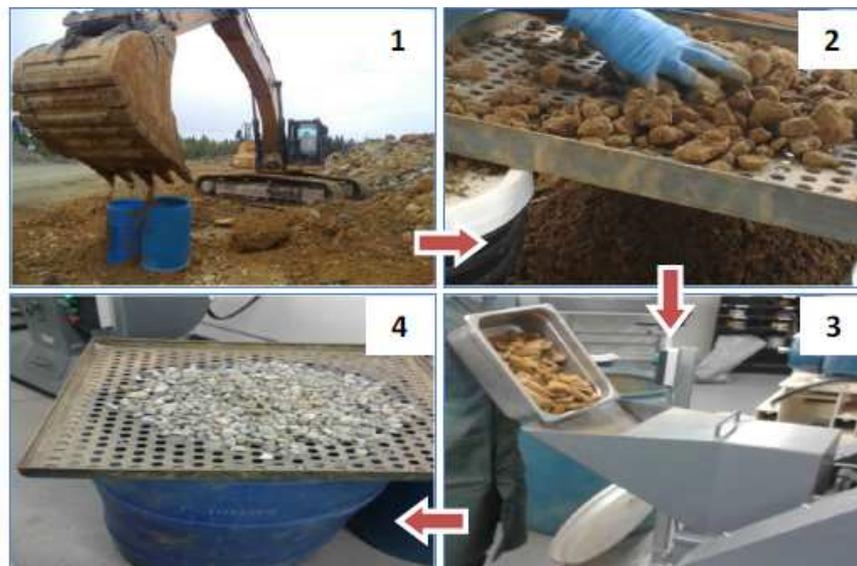


Figure 2-10: Étapes de concassage des roches stériles provenant de la mine LaRonde (d'après Hane et al., 2017)

### 2.5.2 Remblai rocheux cimenté

Le remblai rocheux cimenté est constitué de roches stériles et d'un coulis de ciment. Ce type de remblai est utilisé lorsque la résistance à la compression requise est très élevée, ainsi que le besoin de réduire les quantités de roches stériles stockées à la surface. Le développement des résistances est plus élevé que les autres types de remblai minier cimenté de l'ordre de 20 à 35 % (Grice, 1998 ; Yu et Counter, 1983 ; Yu et al. 1988 ; Chou et al., 2012). Le rapport Eau/Ciment (E/C ou W/C) utilisé varie entre 0,5 et 1,2. L'ajout du coulis de ciment peut se faire avant, pendant ou après la mise en place des roches stériles dans le chantier de remblayage (Annor, 1999).

## 2.6 Hydratation de la pâte de ciment hydraté

### 2.6.1 Mécanisme de la réaction d'hydratation

Les propriétés et la durabilité du béton dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc essentiel de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté. En effet, il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment de l'état liquide à l'état solide (rigide). La pâte de ciment hydraté (Figure 2-11) est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés hydrauliques du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment, le silicate tricalcique ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), le

silicate bicalcique ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), l'Aluminate tricalcique ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) et ferro-aluminate tétracalcique ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{FeO}_{10}$ ) réagissent pour former une matrice insoluble. Le développement de ces réactions entraîne les changements chimiques et physicomécaniques du système et donne lieu à la prise et le durcissement progressif du matériau cimentaire. L'assemblage des cristaux néoformés forme une structure mécaniquement résistante.

Au contact avec de l'eau, les ions de calcium et de silice du  $\text{C}_3\text{S}$  passent rapidement en solution en donnant naissance au gel de silicate de calcium hydraté ou C-S-H (Figure 2-11). Les réactions d'hydratation sont renouvelées à la fin de la période dormante. Une couche néoformée recouvre partiellement le  $\text{C}_3\text{S}$  et elle agit comme une barrière qui ralentit le développement de l'hydratation du ciment. À la fin de la période dormante, cette couche devient perméable à la suite des changements au niveau de la composition, la morphologie ou la destruction de la C-S-H par pression osmotique. Cela permet la régénération et le renouvellement de l'hydratation. Durant cette période d'accélération, la concentration de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) atteint son maximum et commence à cristalliser sous forme de plaques. En même temps, l'enchevêtrement du gel C-S-H comble progressivement les pores entre les cristaux et les autres phases d'hydratation. La couche d'hydrates enrobant la surface de  $\text{C}_3\text{S}$  devient épaisse, et donc elle ralentit le développement des réactions d'hydratation. Cependant, les réactions d'hydratation continueront à évoluer pendant des mois (Aitcin, 2003 ; Tagnit-Hamou, 1995).

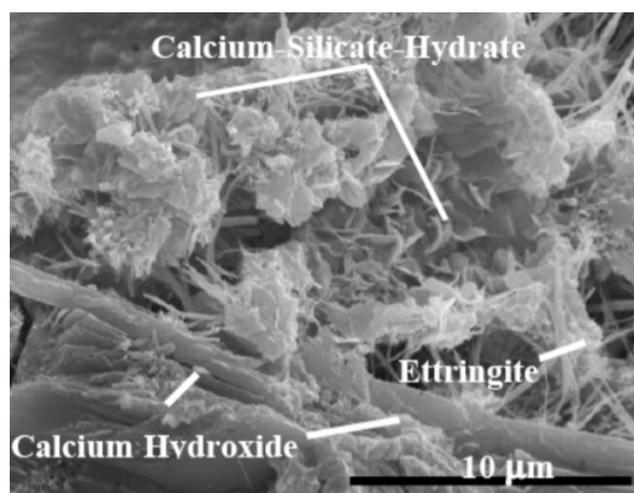


Figure 2-11 : Observation au microscopique électronique à balayage (MEB) des composants d'hydratation du ciment (Tagnit-Hamou, 2013)

### 2.6.2 Hydratation des produits cimentaires incorporant des résidus miniers

Les réactions d'hydratation des mélanges cimentaires à base de résidus miniers dépendent de plusieurs paramètres tels que le type de ciment, le rapport eau/ciment (E/C) et du pourcentage de dosage du liant dans la formulation. Benzaazoua et al. (2004) ont démontré que l'hydratation des liants de remblai en pâte est différente de celle dans les mortiers et bétons. Les paramètres affectants le mécanisme d'hydratation sont présentés dans le Tableau 2-3.

Tableau 2-3 : Les paramètres influents sur l'hydratation des béton/Mortier et remblai en pate cimenté (modifié, Benzaazoua et al., 2004)

<b>Paramètres</b>	<b>Mortier/ Béton</b>	<b>Remblai en pate cimenté</b>
%liant	> 12%	≤ 7%
Rapport E/C	> 0,5	≥ 3
Finesse	mm-cm	µm-cm
Saturation en eau	Non saturé	Saturé (plus que 95%)
Hydratation des solides	Majoritaire	Importante
Précipitation pendant la prise	Négligéable	Importante
Résistance mécanique	Supérieur à 5 MPa	≤ 5 MPa
Sulfures	Rarement présents	Fréquemment présents
Ataque ssulfatique externe	Rare	Fréquente

## 2.7 Récapitulatif

Plusieurs chercheurs ont démontré que la réutilisation des rejets miniers pourrait représenter une bonne approche de mode de gestion des résidus en surface. Ainsi, la valorisation des rejets miniers comme des matériaux de construction dépend de la granulométrie des résidus et/ou de celle des roches stériles, du rapport W/C de la formulation, du type de ciment, de la teneur en sulfures, de la teneur en particules fines, de la teneur en éléments métalliques, etc.

Un mélange cimentaire à base des rejets miniers doit prendre en considération leur variation minéralogique, les cibles à atteindre en termes de résistance, le rôle que doit jouer le matériau cimentaire, le type d'entreposage (en surface ou en souterrain). Vue la complexité de satisfaire à tous ces facteurs, il était impossible de proposer une seule formulation adéquate pour tous les résidus miniers provenant de différentes mines. Voilà pourquoi il est difficile de prédire le comportement du béton ou du mortier incorporant des rejets miniers provenant de plusieurs sources différentes. Par ailleurs, il faudrait toujours optimiser les formulations appropriées de béton, de mortier et de remblai minier pour chaque mine selon les caractéristiques physico-minéralogiques des résidus et/ou des roches stériles.

## Chapitre 3

# MATÉRIAUX ET MÉTHODES

### 3.1 Programme expérimental

Ce chapitre présente les démarches de la valorisation appliquées pour remplacer les matériaux de construction conventionnel par des rejets miniers pour produire des mélanges de mortiers et de bétons. Dans le cadre de ce projet, l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), par l'entremise des partenaires miniers de l'Institut de recherche en mines et en environnement (IRME) nous a fourni cinq résidus miniers qui proviennent de cinq différentes mines au Québec et un seul type de roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic (MCM). Les résidus fins du concentrateur des mines Goldex et LaRonde (Agnico Eagle Ltée), Canadian Malartic (Yamana-Agnico Eagle), Westwood (IAMGOLD) et Casa Berardi (Casa Berardi Québec) ont été utilisés pour remplacer entièrement le sable, tandis que les roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic ont été utilisées pour remplacer le gravier. Le programme expérimental (Figure 3-1) de ce projet comprend d'abord la caractérisation minéralogique et granulométrique des résidus et des roches stériles, puis l'optimisation des paramètres des formulations de béton et mortier. Il s'agira donc de :

- Déterminer les **propriétés physiques** tel que la distribution granulométrique des résidus miniers et des roches stériles échantillonnés ;
- Analyser **la minéralogique** des résidus miniers et des roches stériles qui ont été échantillonnés sur cinq différents sites miniers à l'aide des analyses DRX (diffraction des rayons X) ;
- Formuler des **bétons et mortiers** à base de résidus miniers fins et de roches stériles concassées en optimisant le rapport E/C ;
- Déterminer les **propriétés mécaniques** des échantillons fabriqués via des essais de compression uniaxiale et de traction ainsi que la détermination du module d'élasticité (E) et du coefficient de Poisson ( $\nu$ ) de chaque mélange ;

- Déterminer les **propriétés dynamiques** des cylindres de bétons à l'aide d'essais non destructifs (résistivité électrique et vitesses des ondes ultrasonores)

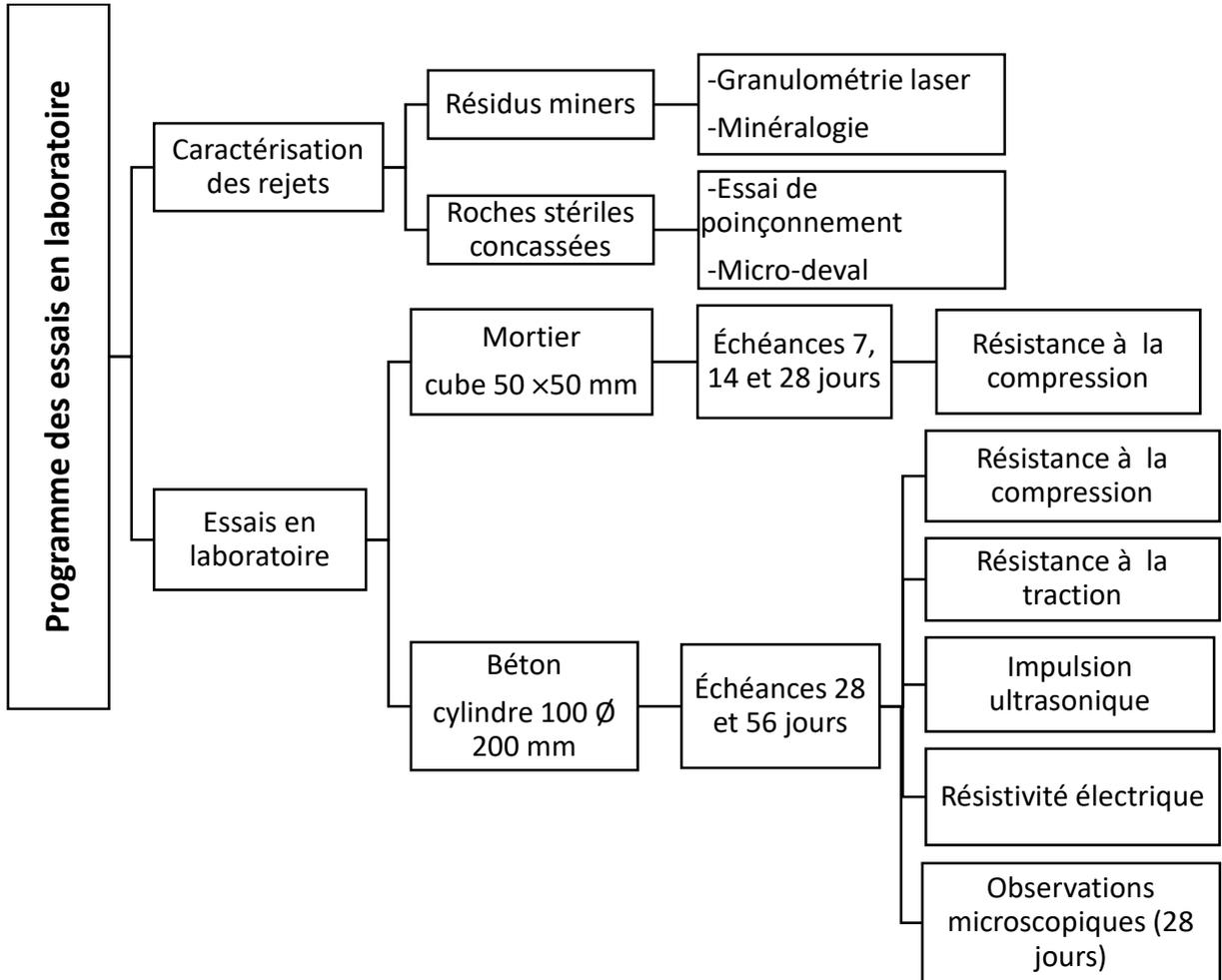


Figure 3-1: Diagramme du programme expérimental

## 3.2 Démarches expérimentales

### 3.2.1 Caractérisation des résidus miniers

La granulométrie des résidus miniers fins a été déterminée à l'aide de l'appareil Mastersizer de Malven Panalytical qui est un analyseur granulométrique par diffraction laser qui fournit des informations quantitatives en fonction de la taille des particules idéalisées comme des sphères (les résidus fins de concentrateur), permettant ainsi de comparer les classes granulométriques des résidus fins des différentes mines.

L'UQAT a fourni des analyses minéralogiques par DRX et par la méthode semi-quantitative de Rietveld des résidus miniers qui ont été réalisées entre 2020 et 2021. Les fiches minéralogiques des résidus montrent à la fois une analyse qualitative permettant d'identifier les minéraux qui les composent et une analyse quantitative permettant de déterminer graphiquement l'abondance de chaque minéral.

### 3.2.2 Caractérisation des roches stériles concassées

Les roches stériles concassées ont été caractérisées d'abord par l'essai de double poinçonnement (*point load test*) (Figure 3-2). Il s'agit d'un test qui vise à évaluer la résistance à la compression de la roche pour des échantillons aux formes irrégulières. Cet essai a été réalisé selon la norme ASTM D5731-16 sur 20 échantillons. L'épaisseur minimale précisée par la norme est de 30 mm. Dans notre cas, il a été impossible de trouver assez de morceaux de roches ayant les dimensions requises. Nous avons donc appliqué cet essai sur des échantillons de roche d'épaisseur comprise entre 24 et 30 mm.



Figure 3-2: Essai de double poinçonnement sur des échantillons de roche de forme irrégulière  
Nous avons également effectué l'essai Micro-Deval selon la norme LC 21-070 afin d'évaluer la résistance à l'abrasion des roches stériles. L'essai a été effectué sur 500 g de particules de taille de l'ordre de 10/20 mm selon le grade B (classe la plus couramment utilisée pour caractériser les granulats de construction). Il s'agissait de mélanger 250 g de granulats de taille 14 à 20 mm et 250 g de granulats de taille 10 à 14 mm (Figure 3-3).



Figure 3-3 : Essai Micro-Deval sur les roches stériles concassées

### 3.2.3 Fabrication du mortier

#### 3.2.3.1 Conditionnement et conservation des résidus miniers

Les résidus miniers ont été séchés à l'air libre avant de les utiliser dans des mélanges cimentaires (Figure 3-4). Il était plus conforme de simuler les mêmes conditions de conservation que celles prévalant aux mines (conservation en surface dans des parcs d'accumulation).



Figure 3-4: Résidus humides (à gauche) et résidus séchés (à droite)

Les Teneurs en eau des résidus ont été déterminées après leur séchage. Le .

Tableau 3-1 illustre les teneurs en eau obtenues.

Tableau 3-1 : Teneur en eau pondérale des résidus miniers après leur séchage à l'air libre

Résidus de la mine	Teneur en eau des résidus W(%)
LaRonde	0,22
Westwood	0,18
Casa Berardi	0,12
Goldex	0,46
Canadian Malartic	0,48

#### 3.2.3.2 Optimisation et préparation des mélanges de mortiers

En se basant sur les travaux de recherche effectués par Argane et al. (2015) et Hane et al. (2016) sur le choix des paramètres considérés dans la formulation de bétons et de mortiers à base des résidus miniers, deux mélanges pour chaque source de résidus ont été produits en visant le

rapport E/C de 0.8 (mélange 1) et 1.3 (mélange 2) (Figure 3-6). Un total de 108 cubes de dimension 50×50 mm pour six formulations de mortiers ont été fabriqués en variant la source de résidus incorporés et le sable ordinaire a été utilisé dans la composition du mélange témoin.

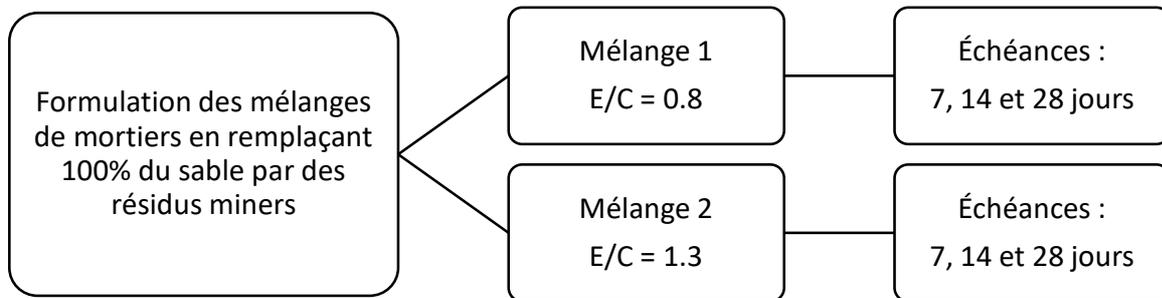


Figure 3-5: Formulation des paramètres des mélanges de mortier

Comme cette étude de valorisation vise à maximiser le taux de remplacement du sable par des résidus miniers, le taux de remplacement a été fixé à 100% pour chaque mélange en variant la source de résidus incorporés. Le Tableau 3-2 illustre le dosage des ingrédients du mortier.

Le malaxage des mélanges de mortier a été effectué à l'aide d'un malaxeur Hobart selon la norme ASTM 305-20. Les cubes de mortier ont été conservés dans la chambre de murissement pendant 28 jours à une température constante de 20°C (Figure 3-6).

Tableau 3-2: Formulation du mortier

Mélange	Nombre de cubes	E/C	Résidus miniers (g)	Eau (g)	Ciment (g)
M1	54	0.8	2290	733	916
M2	54	1.3	2290	1190	916



Figure 3-6 : Confection des cubes de mortier : moules cubiques (gauche) et cubes (droite)

En prenant en considération la faible finesse des résidus miniers par rapport au sable conventionnel de construction, il était plus conforme de tamiser le sable ordinaire et d'incorporer le passant au tamis 1.25 mm dans la composition du mortier témoin (Figure 3-7). Cela permet de rapprocher la granulométrie du sable du mélange témoin à celles des résidus miniers. Et finalement, les résultats pourraient être plus cohérents et comparables avec les mélanges de mortiers à base des résidus fins.



Figure 3-7 : Sable fin utilisé dans la formulation des mélanges témoins

Dans cette étude, l'eau utilisée dans les formulations est l'eau potable du robinet de la ville de Sherbrooke et le ciment utilisé pour la confection des mélanges est le ciment Portland de type GU. Le Tableau 3-3 présente la fiche de la composition chimique du ciment GU.

Tableau 3-3 : Composition chimique du ciment GU

Les composants	Proportion %
SiO <sub>2</sub>	20,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6
CaO	62,8
MgO	2,1
SO <sub>3</sub>	3,4
Alcalis équivalents	0,8
PAF	2,4

### 3.2.4 Fabrication du béton

#### 3.2.4.1 Préparation des roches stériles

L'UQAT a fourni des roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic. La première étape à entreprendre avant de les incorporer dans le béton est de les laver puis de les tamiser pour éliminer les fractions les plus fines et les plus grossières (poussières et gros blocs de roches). Les granulats de roches stériles conservés ont une classe granulométrique entre 5 et 20 mm pour la formulation du béton. La Figure 3-8 montre la méthode de la préparation des roches stériles pour qu'elles soient prêtes à remplacer les granulats ordinaires.



Figure 3-8 : Préparation des roches stériles concassées : tamisage (à gauche) et lavage (à droite)

#### 3.2.4.2 Optimisation des mélanges en remplaçant le sable par des résidus miniers et les granulats par des roches stériles concassées

Une formulation standard du béton a été appliquée en maximisant la réutilisation des matériaux miniers. Par ailleurs, le sable et le gravier sont totalement remplacés par des résidus miniers fins et des roches stériles concassées. Pour le premier mélange (LaRonde), la formulation appliquée avait un rapport  $E/C = 0.45$  et  $C/S = 0.5$ , en remplaçant respectivement 100% du sable et des granulats par des résidus fins de la mine LaRonde et des roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic. Mais en raison de la finesse des résidus et de leur pouvoir de rétention d'eau, il était plus approprié d'apporter des ajustements de gâchées (quantité d'eau) et des résidus incorporés.

Le Tableau 3-4 détaille la formulation finale utilisée pour tous les mélanges de bétons composites fabriqués par des matériaux miniers et le béton témoin fabriqué par des matériaux standards (des granulats et du sable non tamisé).

Tableau 3-4: Formulation du béton

	Béton composite	Béton témoin

<b>E/C</b>	0,75	0,75
<b>C/S</b>	0,65	0,65
<b>Ciment (g)</b>	14400	14400
<b>Eau (g)</b>	10900	10900
<b>Résidus miniers humides (g)</b>	21800	_____
<b>Sable (g)</b>	_____	21800
<b>Stériles concassées (g)</b>	23700	_____
<b>Granulats standards (g)</b>	_____	23700

### 3.2.4.3 Préparation des mélanges de béton

Les résidus miniers humides, les roches stériles concassées, l'eau de gâchage (eau de robinet) et le ciment GU ont été préparés pour la confection du béton. Le malaxage était effectué à l'aide d'un petit malaxeur Monarch. Au total, 16 cylindres de dimensions 100 Ø et 200 mm ont été fabriqués (Figure 3-9). La détermination de l'ouvrabilité du béton à l'état frais était réalisée selon l'essai d'affaissement au cône d'Abrams CSA-A23.2-5C (Figure 3-10).

Les cylindres de béton ont été couverts par un film de plastique pour garder l'humidité du mélange et éviter l'évaporation de l'eau de mélange. Après 24 heures, le démoulage et le marquage a été fait, puis les échantillons ont été placés dans la chambre de murissement durant la période de cure de 28 et 56 jours à 20°C (Figure 3-11).



Figure 3-9 : Confection des cylindres de béton, dosage des ingrédients (à gauche) et préparation des cylindres et du malaxeur (à droite)



Figure 3-10 : Essai d'affaissement au cône Abrams



Figure 3-11 : Cylindres de béton coulés

### 3.2.5 Essais effectués sur des échantillons de béton et de mortier

#### 3.2.5.1 Essais non destructifs : résistivité électrique et impulsion ultrasonique

Des essais non destructifs tels que la résistivité électrique et la vitesse d'impulsion ultrasonique ont été réalisés sur les surfaces des cylindres de béton (100 Ø 200 mm). Les échantillons ont été testés avant l'application des essais destructifs. Cette méthode permet de confirmer les résultats mécaniques trouvés.

L'essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique a été appliqué pour exciter les ondes de surface des échantillons de béton. Un émetteur d'une fréquence de 50 MHz et un récepteur captif sont placés sur les surfaces du cylindre. Le dispositif utilisé est le Proceq (Figure 3-12). Cet essai a été appliqué selon la norme ASTM C597. Le dispositif présente sur un écran la valeur de la vitesse d'impulsion pour chaque cylindre.

La porosité et la conductivité du béton fabriqué par des matériaux de valorisation (résidus miniers fins et roches stériles concassées) ont été testés par l'essai de résistivité électrique. Les informations obtenues aident à l'évaluation du potentiel ionique du béton en remplaçant le sable par des résidus miniers et les granulats par des roches stériles concassées. Le dispositif utilisé est le RCON (*Concrete Resistivity Meter*) (Figure 3-12). Cet essai a été exécuté selon la norme ASTM C1760.



Figure 3-12 : Essai de résistivité (à gauche) et essai d'impulsion ultrasonique (à droite)

### 3.2.5.2 Essais destructifs (essai de compression uniaxiale et essai Brésilien)

La résistance à la compression uniaxiale des mélanges a été déterminée sur des cubes de mortier de 50 x 50 x 50 mm (ASTM C 109) et sur des cylindres de béton 100 Ø 200 mm (ASTM C39) (Figure 3-13). Pour chaque mélange de mortier, l'essai de compression a été réalisé sur 3 cubes de mortier à 7, 14 et 28 jours à l'aide de la presse mécanique manuelle. La résistance à la compression des cylindres de béton a été déterminée à l'aide de la presse mécanique MTS2670 à 28 et 56 jours.

Le module d'élasticité ( $E$ ) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) ont également été déterminés selon la norme ASTM C469 (Figure 3-13). Trois cylindres de béton ont été testés à 28 et 56 jours selon la norme ASTM C496 afin de déterminer la résistance à la traction indirecte des bétons (Figure 3-14).



Figure 3-13 : Essai de compression uniaxiale sur un cube de mortier (à gauche), sur un cylindre de béton (au milieu) et essai de coefficient de poisson et module de Young (à droite)



Figure 3-14 : Détermination de la résistance à la traction indirecte (Brésilien) sur des cylindres de béton

### 3.2.5.3 Observations au microscope électronique à balayages (MEB)

Une étude de la microstructure du béton a été réalisée au microscope électronique à balayage (MEB) sur des fractures fraîches de béton (Figure 3-15). Les observations permettent de visualiser la texture d'hydratation du béton incorporant des matériaux miniers (résidus miniers et roches stériles concassées).

Des morceaux de béton ont été préparés selon les normes ASTM C1723-16 et ASTM C457/C457M-16. Il s'agit de métalliser les échantillons de béton par un fil de carbone brûlé. Cette technique augmente la conductivité des échantillons et elle contrôle la qualité des observations microscopiques. Elle permet surtout d'obtenir des images MEB plus claires et plus nettes. Le balayage des images MEB permet d'observer les réactions des phases d'hydratation du ciment (Portlandite et gel C-S-H) avec les microparticules des résidus miniers dans le béton. Le Tableau 3-5 présente l'âge de durcissement des échantillons de béton testés.

Tableau 3-5 : Ages des échantillons de béton testés

Mélanges	Ages	
	Durcissement dans la chambre humide	Préservation à l'air libre
Témoin	28 jours	54 jours
Westwood	28 jours	69 jours
Goldex	28 jours	47 jours

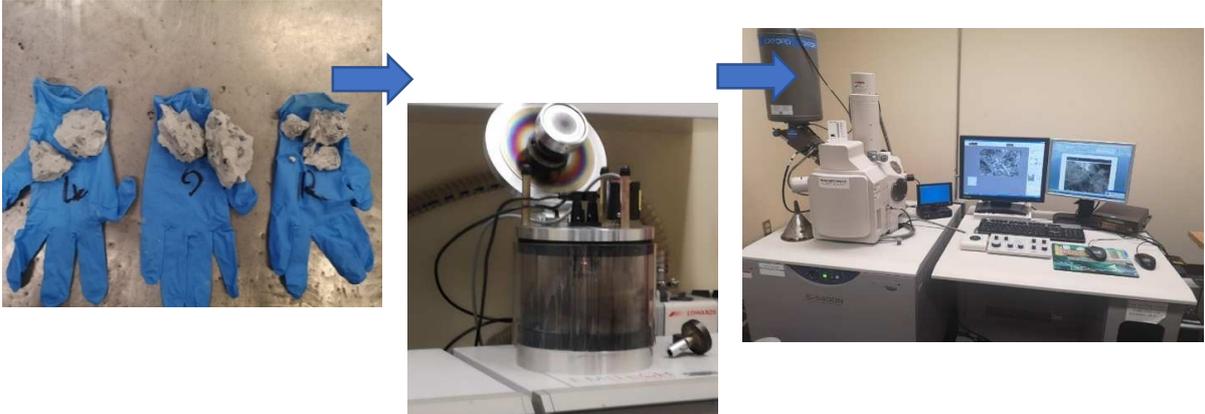


Figure 3-15 : Préparation des échantillons de béton, métallisation des échantillons et Microscope électronique à balayage (MEB)

## Chapitre 4

### RÉSULTATS ET LEUR ANALYSE

#### 4.1 Essais de caractérisation des résidus miniers et des roches stériles

Des analyses minéralogiques et granulométriques, ainsi que des essais de double poinçonnement et Micro-Deval ont été réalisés sur les résidus miniers et les roches stériles concassées respectivement avant leur utilisation en remplacement du sable et des granulats.

##### 4.1.1 Analyse granulométrique

Les Figure 4-1 et Figure 4-2 présentent les résultats obtenus de la granulométrie laser et de la granulométrie par tamisage appliquées respectivement sur les cinq résidus miniers et le sable de référence. Une variabilité granulométrique a été observée sur les courbes. Chaque type de résidus est caractérisé par une classe granulométrie différente. Le Tableau 2-1 illustre une comparaison des dimensions des particules ainsi que les résultats des coefficients d'uniformité et de courbure. La médiane des cinq résidus miniers permet de classer ces matériaux miniers selon la taille. Cette analyse montre que :

- Les résidus de LaRonde sont les plus grossiers, 50% de volume ayant un diamètre de 40  $\mu\text{m}$ .
- Les résidus les moins grossiers sont ceux de Westwood et Goldex, 50% de volume ayant un diamètre de 21  $\mu\text{m}$ .
- Les résidus les plus fins sont de Malartic et Casa Berardi 50% de volume ayant un diamètre de 15 et 12  $\mu\text{m}$  respectivement.

Le sable de référence montre une classe granulométrique plus grossière que celles des résidus miniers avec un pourcentage de 50% des particules qui ont une taille de 800  $\mu\text{m}$ .

Tableau 4-1: Paramètres granulométriques usuels des résidus miniers

	<b>D<sub>10</sub></b>	<b>D<sub>30</sub></b>	<b>D<sub>50</sub></b>	<b>D<sub>60</sub></b>	<b>Cu</b>	<b>Cc</b>
<b>Unité</b>	<b>µm</b>					
Témoin	510	650	800	1000	1,5	0,83
LaRonde	6	20	40	55	9,16	1,21
Canadian Malartic	2,3	7	15	20	8,69	1,06
Westwood	4,5	13	21	28	6,22	1,34
Casa Berardi	2,5	6,5	12	15	6	1,12
Goldex	2,3	9,5	21	30	13,04	1,3

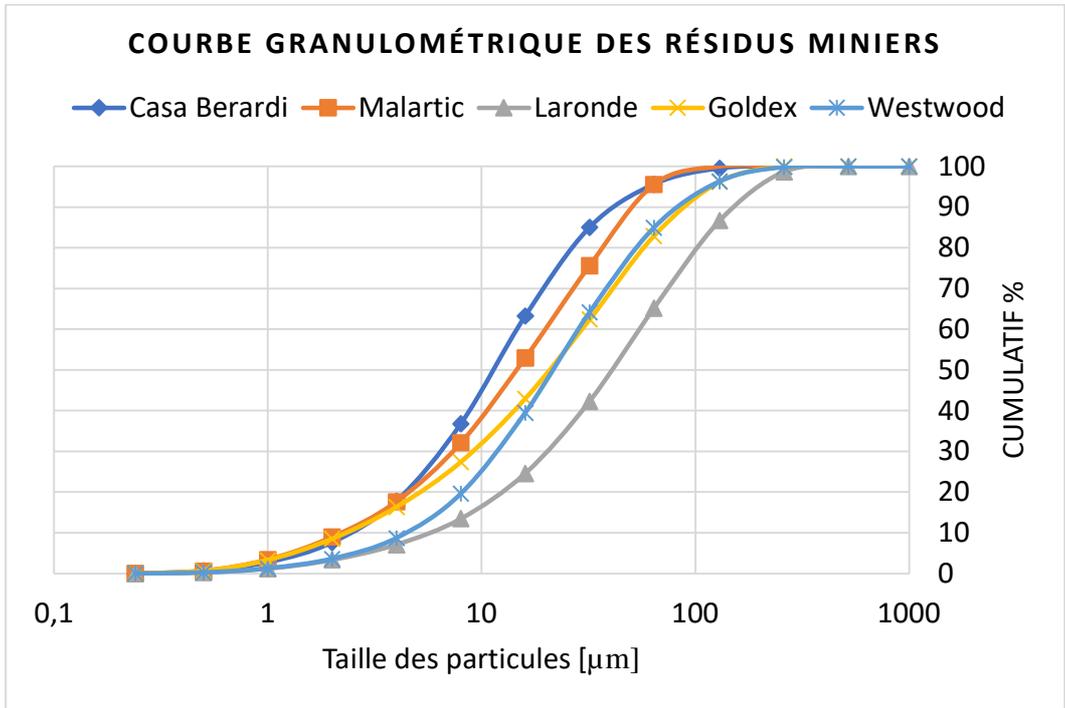


Figure 4-1 : Courbes granulométriques des résidus miniers

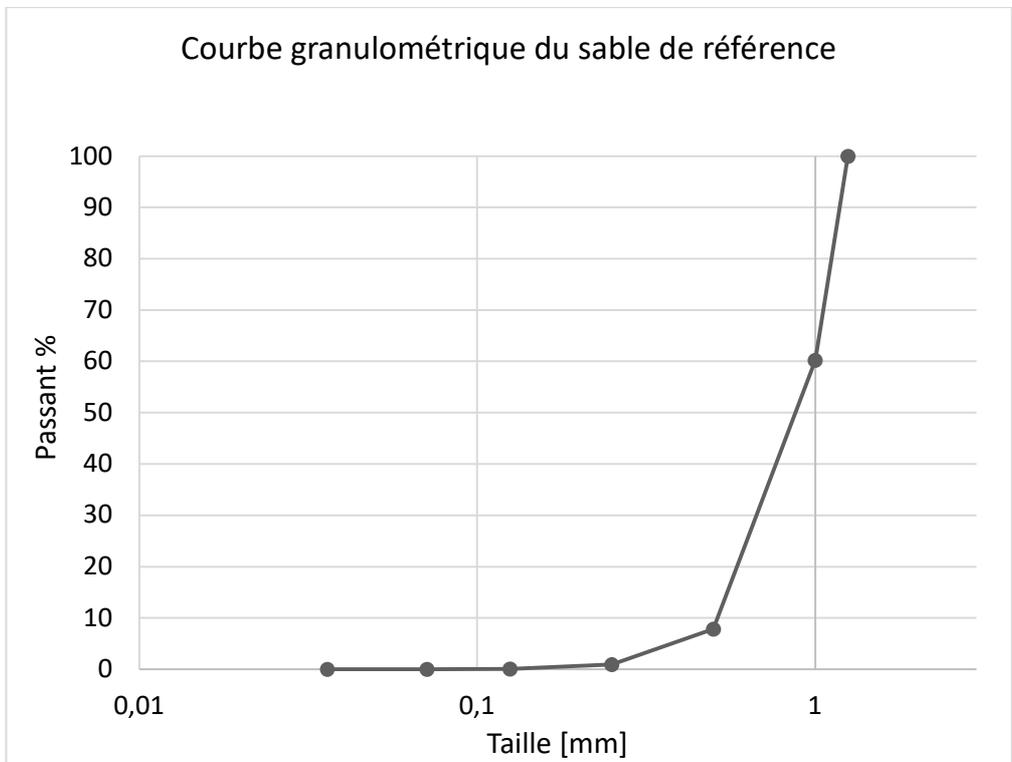


Figure 4-2: Courbe granulométrique du sable de référence

#### 4.1.2 Minéralogie

Le Tableau 4-2 présente les compositions minéralogiques données par les analyses de diffraction des rayons X (DRX). Les principales phases minéralogiques détectées dans les cinq résidus miniers sont le quartz (entre 25% et 66%) et l'albite (entre 8% et 47%). Aussi, ces résultats montrent la présence de sulfures dans certains résidus miniers tels que LaRonde, Westwood et Casa Berardi. Les résidus les plus sulfureux proviennent de la mine LaRonde avec un pourcentage de 17%.

Tableau 4-2 : Minéralogie des résidus miniers

	Goldex	Casa Berardi	Westwrod	Malartic	laRonde
Minéral	Proportion %Résidu				
Quartz	25,1	41,2	47,82	25,6	66,16
Albite	42,7	8,7	12,45	42,48	
Pyrite	—	9	7,67	—	17,14
Chlorite	7,5	0,7	22,08	6,57	—
Muscovite	4,4	20,3	0,66	—	0,13
Cordiérite	11,7	17,1	12,45		8,16
Calcite	6,9	—	—	5,46	6,75
Gypse	0,9	—	—	—	0,27
Anhydrite	1	—	6,03	—	—
Sphalérite	—	—	0,78	7,5	—
Ankérite	—	17,1	—	8,87	—
Magniétite	—	—	2,33	—	—
Augite	—	—	—	1,2	—
Rutile	—	—	—	2,04	—
Orthoclase	—	—	—	7,5	—
Phlogopite	—	—	—	8,87	—
Chamosite	—	—	—	—	6,75
Chalcopyrite	—	—	—	—	0,63
Pyrrhodite	—	—	—	—	0,75

#### 4.1.3 Essai de double poinçonnement (résistance à la compression)

Les résistances à la compression des particules de roches stériles ont été déterminées selon la norme ASTM D5731-16. Elle consiste à fixer un facteur constant K selon l'épaisseur des échantillons de roche testés. Dans ce cas, les morceaux de roches étaient inférieurs à 30 mm, donc le facteur choisi était  $K = 18$ . La relation  $S_c = K \times I_s$  donne la résistance à la compression estimée.

L'essai de double poinçonnement a été appliqué sur 20 morceaux de roches stériles concassées provenant de la mine Canadian Malartic. Les échantillons de roches testés avaient des formes irrégulières. La valeur moyenne de l'indice de poinçonnement était de 13 MPa ; ce qui équivaut à une résistance à la compression de 200 MPa, confirmant que les roches stériles concassées ont une très bonne résistance. La Figure 4-6 montre la variation de la résistance à la compression par morceau de roche testé. On remarque que la valeur maximale et la valeur minimale de la résistance à la compression estimée est entre 110 et 280 MPa. Ces résultats montrent que la résistance à la compression des roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic ne pose donc pas de problème pour une utilisation comme source de granulats pour la fabrication du béton.

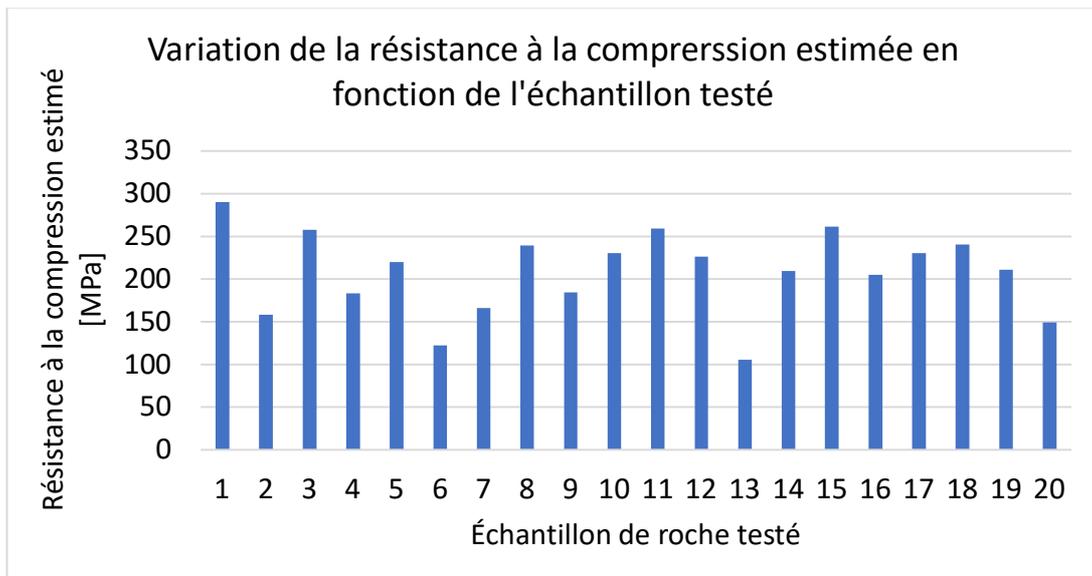


Figure 4-3 : Variation de la résistance à la compression estimée en fonction de l'échantillon de roche testé

#### 4.1.4 Essai Micro-Deval

Le Tableau 4-3 présente le résultat de l'essai Micro-Deval appliqué sur les roches stériles concassées. Cet essai montre la bonne résistance à l'abrasion des granulats testés. La résistance à l'abrasion a été calculée selon la norme LC 21-070. Le pourcentage de l'usure était de 3.9% par rapport à une valeur maximale de 10%. Ce faible pourcentage indique que les roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic a perdu très peu de son poids durant les mouvements de frottements (l'abrasion) dans la cellules d'essai. Ces matériaux peuvent représenter une bonne source granulaire pour la fabrication du béton en remplaçant les granulats ordinaires.

Tableau 4-3 : Résultats de l'essai Micro-Deval

Micro-Deval	M 1 [g]	M 2 [g]	Pourcentage d'usure Micro-Deval %
	500	480,7	3,9

#### 4.2 Résistance à la compression uniaxiale des mortiers

L'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur 3 cubes de mortier à chaque échéance. Comme attendu, les résultats montrent que l'augmentation du rapport E/C de 0,8 (M1) à 1,3 (M2) affecte les propriétés mécaniques des mortiers avec les résidus miniers. En comparant les résistances à la compression des cubes de mortier à 28 jours, on remarque une diminution des résistances à la compression des cubes de mortiers (50×50 mm) de l'ordre de 29% à 65% des mélanges préparés selon la formulation M2 par rapport à M1 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Donc, lorsqu'on augmente le rapport E/C de la formulation du mortier en remplaçant le sable par des résidus miniers, les résistances diminuent même en variant la source des résidus incorporés (Figure 4-4).

Le Tableau 4-4 présente la tendance de la variation des résultats de résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours par rapport au témoin. On remarque que les valeurs de résistances sont plus variables pour le mélange M1 comparativement à M2. Certains mélanges tels que Westwood augmentent légèrement avec le temps alors que Canadian Malartic et Goldex varient plus avec le temps (Figure 4-4).

D'après les résultats granulométriques, les résidus miniers ont une granulométrie très fine par rapport au sable. C'est pour cela la finesse des résidus miniers des différentes mines agit sur l'hydratation des mélanges de mortier et par conséquent elle affecte les résistances à la compression.

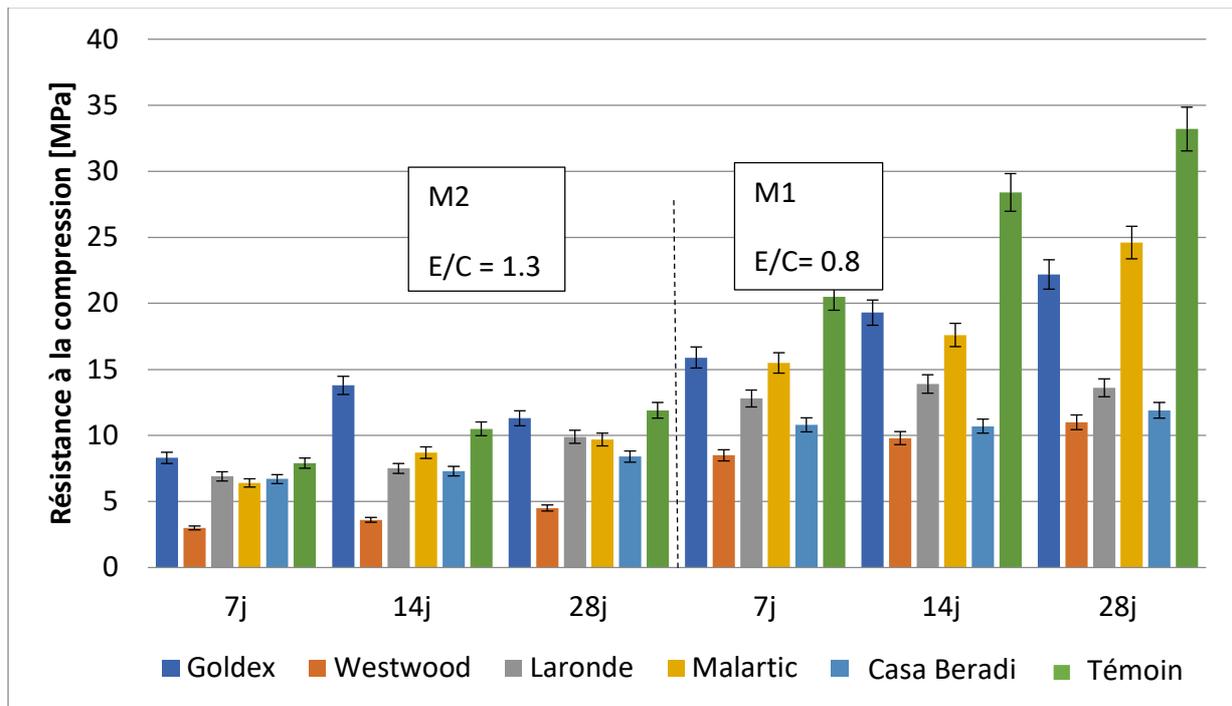


Figure 4-4 : Variation de la résistance à la compression des mortiers à base des résidus miniers

Tableau 4-4 : Variation des résistances à la compression moyenne des mortiers par rapport au témoin

Échéance	M2			M1		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
Unité	%					
Goldex	5,1	31,4	-5	-22,4	-32	-31,1
Westwood	-62	-65,7	-62,2	-58,5	-65,5	-66,9
Laronde	-12,7	-28,6	-16,8	-37,6	-29,9	-59
Malartic	-19	-17,1	-18,5	-24,4	-38	-25,9
Casa Berardi	-15,2	-30,5	-29,4	-47,3	-62,3	-64,2

( ) augmentation, (-) diminution

Comme la taille et la chimie des particules minières sont variables, on remarque que les résidus miniers de Casa Berardi (Casa Berardi) et de Westwood demandent plus d'eau le temps du malaxage pour qu'ils puissent s'hydrater. Le pourcentage en particules fines (inférieur à 20 µm) joue un rôle très important sur la demande en eau. Cela a été noté lors de la fabrication des mortiers et surtout lors de la préparation des mélanges avec les résidus de Casa Berardi (Casa Berardi) et de Westwood. Les observations visuelles ont indiqué que ces mélanges (Casa Berardi et Westwood) ont été plus fermes que le reste des mélanges. La rétention des microparticules de résidus miniers a affecté la quantité d'eau ajoutée. C'est pour cette raison que le temps de malaxage a été prolongé de 2 min environ afin d'obtenir une bonne consistance des mélanges.

Comparativement aux restes des mélanges, les résultats de l'essai de compression uniaxiale des cubes de mortiers de Westwood et de Casa Berardi coïncident avec ces observations lors du malaxage et ces mélanges enregistrent les plus faibles résistances à la compression à 28 jours de durcissement de 4,5 MPa (E/C=0.8) et 11 MPa (E/C=1.3) pour le mortier Westwood et 8,4 MPa (E/C=1.3) et 11,9 MPa (E/C=0.8) pour le mortier Casa Berardi. Donc, la consistance des mélanges de mortier semble affecter le développement des résistances des mélanges de mortier.

Tableau 4-5 : Variation des pourcentages d'augmentation des résistances à la compression des cubes de mortiers du mélange M1 (E/C=0.8) par rapport M2 (E/C=1.3) à 28 jours

<b>Mélange</b>	<b>M2</b>	<b>M1</b>	<b>Pourcentage de réduction du M1 par rapport M2</b>
<b>Unité</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>
Goldex	11,3	22,2	49,1
Westwood	4,5	11	59,1
LaRonde	9,9	13,6	27,2
Malartic	9,7	24,6	60,6
Casa Berardi	8,4	11,9	29,4
Témoin	11,9	33,2	64,2

La Figure 4-5 montre une coloration d'oxydation superficielle des cubes de mortier des mélanges LaRonde, Casa Berardi, Westwood et Canadian Malartic à 28 jours. Cette coloration résulte de l'oxydation des sulfures près de la surface. Rappelons qu'un taux élevé de pyrite a été observé dans la composition des résidus des mines LaRonde et Casa Berardi. Des traces d'oxydation moins intense ont été observées sur la surface des cubes de mortier des mélanges Canadian Malartic et Westwood. L'intensité de l'oxydation semble proportionnelle à la concentration des éléments sulfureux des résidus.



Figure 4-5 : Cubes de mortier oxydés

### 4.3 Essais réalisés sur le béton

#### 4.3.1 État frais

Le Tableau 4-6 présente les résultats du test d'affaissement au cône Abrams. En appliquant la même formulation, on note que trois types de propriétés à l'état frais ont été obtenus. Une consistance plastique des mélanges de LaRonde, Casa Berardi et Westwood, une consistance fluide des mélanges de Goldex et Canadian Malartic et une consistance très fluide du témoin ont été observées (Figure 4-6). L'origine de la différence de l'ouvrabilité des bétons fabriqués est expliquée par la variation minéralogique et aussi bien la fine granulométrie des résidus utilisés.

Des travaux de recherche antérieurs ont montré que la fraction fine demande plus d'eau et affecte aussi la résistance à la compression (Hane et al., 2016 ; Annor, 1999 ; Fall et al., 2005).

Tableau 4-6 : Résultats du test d'affaissement au cône Abrams

Mélange	Affaissement [mm]	Propriété à l'état frais
LaRonde	76	Plastique
Casa Berardi	65	Plastique
Westwood	72	Plastique
Goldex	164	Fluide
Canadian Malartic	204	Fluide
Témoin	265	Très fluide



Figure 4-6 : Consistance très fluide (à gauche), fluide (au milieu) et plastique (à droite)

#### 4.3.2 État durci

##### 4.3.2.1 Essais non destructifs

La Figure 4-7 présente les résultats des essais non destructifs effectués à 28 et 56 jours sur les cylindres de béton fabriqués en remplaçant le sable et les granulats par des résidus miniers et des roches stériles concassées. Globalement, ces mélanges ont atteint des valeurs de résistance plus faibles que celles du témoin et que les résistivités électriques et les vitesses d'impulsions sont corrélées avec les temps de cure, avec une légère variation des résultats à 28 et 56 jours.

La résistivité augmente légèrement avec le murissement. Le Tableau 4-7 présente les pourcentages de variation par rapport au témoin à 28 et 56 jours. Une réduction considérable de

plus de 54% est notée de la résistivité électrique des mélanges Casa Berardi, Canadian Malartic, LaRonde et Westwood. Comparativement au témoin, la réduction des résistivités électriques des bétons incorporant des rejets miniers peut être liées à la présence des minéraux métalliques dans les résidus.

Les résultats des résistivités électriques des mélanges à base de matériaux miniers varient entre 13 et 18 K $\Omega$ .cm par rapport à 30 K $\Omega$ .cm du mélange témoin. Une augmentation de 0.3 à 3 K $\Omega$ .cm est obtenue entre les résultats à 28 et 56 jours de durcissement.

Concernant la variation des vitesses ultrasonores, les valeurs augmentent légèrement en fonction du temps avec un léger écart de 50 à 310 ms<sup>-1</sup> entre 28 et 56 jours (Tableau 4-7 : Pourcentage de variation des paramètres des essais non destructifs par rapport au témoin). Cela est expliqué par la diminution des pores lors du durcissement. Une diminution de 18% par rapport au témoin des vitesses ultrasonores du mélange Westwood est notée à 28 et 56 jours de durcissement.

Selon les résultats des essais non destructifs, les bétons fabriqués à base de matériaux miniers sont denses et de faible porosité. La fine granulométrie des résidus permettrait d'avoir cette texture compacte des cylindres de bétons testés. Cela est expliqué par l'augmentation de la vitesse des ondes de compression, la variabilité minéralogique et surtout la présence des microparticules métalliques qui réduit la résistivité électrique mesuré aux différentes échéances.

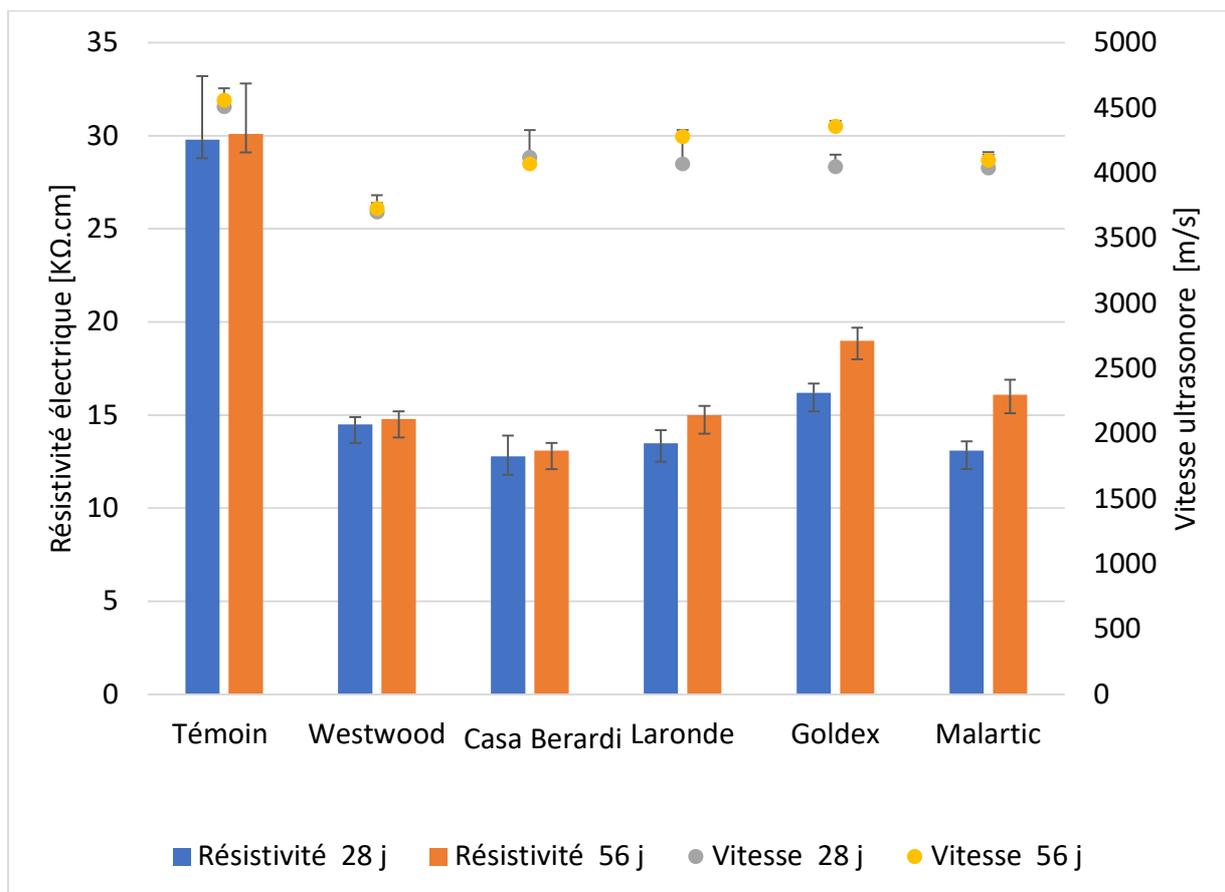


Figure 4-7 : Variation des valeurs des essais non destructifs

Tableau 4-7 : Pourcentage de variation des paramètres des essais non destructifs par rapport au témoin

	Résistivité électrique		Vitesse d'impulsion	
	28j	56j	28j	56j
<b>Variation [%]</b>				
Westwood	-51,3	-50,8	-18,0	-18,2
Casa Berardi	-57,0	-56,5	-8,6	-10,7
LaRonde	-54,7	-50,2	-9,8	-6,1
Goldex	-45,6	-36,9	-10,2	-4,4
Canadian Malartic	-56,0	-46,5	-10,4	-10,1

Tableau 4-8 : Ecart d'évolution des résultats des essais non destructifs en fonction du temps de durcissement

	Écart de résistivité (56j-28j)	Écart de vitesse d'impulsion (56j-28j)
Unité	K $\Omega$ .cm	ms <sup>-1</sup>
Témoin	0,3	50
Westwood	0,3	30
Casa Berardi	0,3	-50
LaRonde	1,5	210
Goldex	2,8	310
Canadian Malartic	3	60

#### 4.3.2.2 Propriétés mécaniques

Les Figure 4-11 et Figure 4-9 présentent les résultats des résistances à la compression et à la traction à 28 et 56 jours. On remarque une légère augmentation de la résistance à la compression de plusieurs mélanges à base de rejets miniers entre 28 jours et 56 jours.

Les mélanges de béton contenant des résidus miniers des mines Casa Berardi, LaRonde, Canadian Malartic et Goldex ont développé des résistances à la compression plus élevées que le témoin à 28 jours. Cette différence est de l'ordre de 37%, 78%, 58% et 33% respectivement pour les mélanges Casa Berardi (20 MPa), Goldex (26 MPa), Canadian Malartic (20 MPa) et LaRonde (24 MPa). Le mélange incorporant les résidus de Westwood (13 MPa) a enregistré une légère diminution de l'ordre de 12% par rapport au témoin. À plus long terme (56 jours de durcissement), de faibles augmentations des résistances à la compression de 0 à 7% ont été notées pour tous les mélanges à base de rejets miniers. En revanche, une grande augmentation de la résistance à la compression (UCS) du mélange témoin de l'ordre de 208% (aberrante) a été observée. La résistance à la compression du témoin a augmenté de 14.8 MPa (28 jours) à 32 MPa (56 jours). Ce résultat absurde peut être en lien avec des imperfections lors du coulage (des cylindres qui contiendraient moins de granulats) ou à une erreur humaine ou expérimentale.

Concernant les résistances à la traction à 28 jours, le mélange de Goldex a atteint une valeur moyenne de 2,7 MPa, soit de 0,1 MPa supérieure au témoin. En revanche, les autres mélanges ont atteint en moyenne des résistances à la traction plus faibles que celle du témoin. Cette diminution est de l'ordre de 49%, 28%, 14% et 8% respectivement pour les mélanges Westwood ayant la plus faible résistance à la traction (1,1 MPa), Casa Berardi (1,8 MPa), LaRonde (2,0 MPa) et Canadian Malartic (2,3 MPa) (Tableau 4-9). Une évolution significative de la résistance à la traction des mélanges de béton incorporant des matériaux miniers a été noté en fonction du temps de durcissement (56 jours). Cette augmentation est de l'ordre de 10 à 30%.

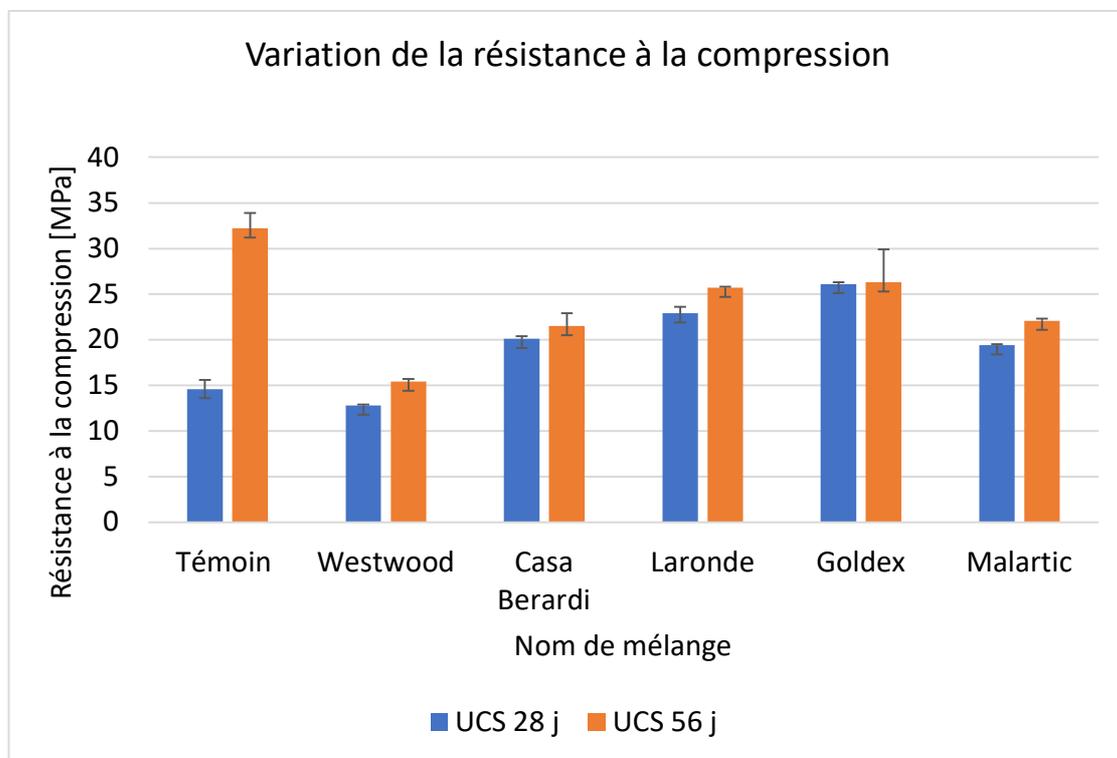


Figure 4-8 : Variation de la résistance à la compression (UCS)

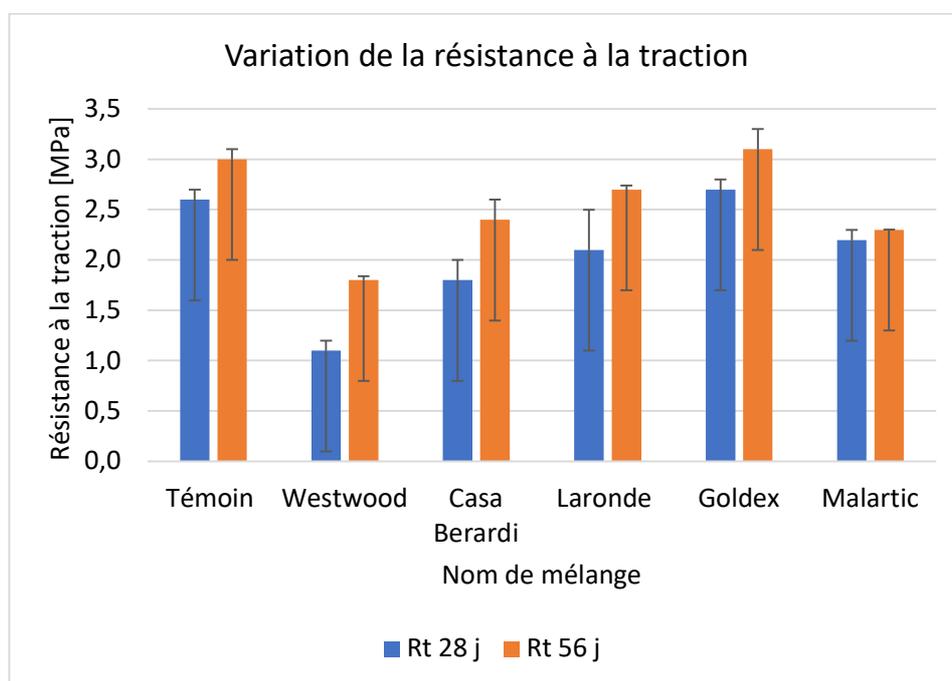


Figure 4-9 : Variation de la résistance à la traction

Tableau 4-9 : Pourcentage de variation des résistances mécaniques par rapport au témoin

Échéance	UCS		Rt	
	28j	56j	28j	56j
<b>Variation %</b>				
Westwood	-12,3	-52,2	-49,0	-34,2
Casa Berardi	37,7	-33,2	-14,1	-14,3
LaRonde	56,8	-20,2	-27,7	-10,3
Goldex	78,8	-18,3	32,5	14,0
Canadian Malartic	32,9	-31,4	-8,3	-17,3

Le ratio  $UCS/Rt_{28 \text{ jours}}$  de tous les mélanges à base des résidus miniers [de 8,5 à 12] sont supérieurs à celui du ratio  $UCS/Rt_{56 \text{ jours}}$ . Cependant, le ratio  $UCS/Rt_{28 \text{ jours}}$  du mélange témoin est considérablement plus faible que celui à 56 jours (Figure 4-10).

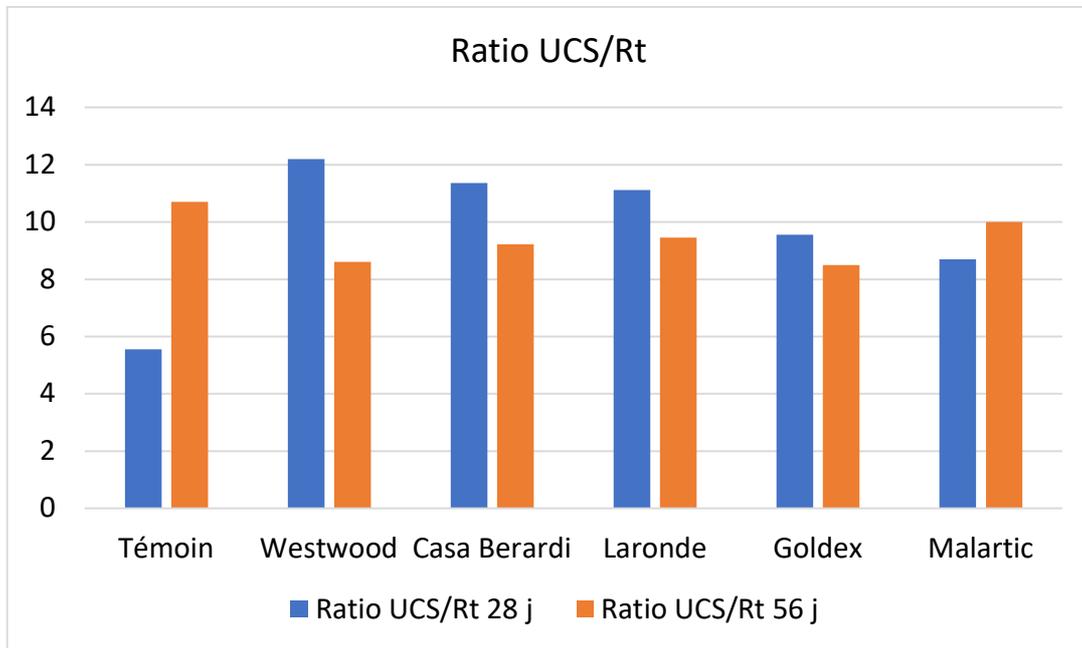


Figure 4-10 : Variation du ratio UCS/Rt en fonction du temps de durcissement

Les résultats des paramètres mécaniques montrent que les bétons incorporant des matériaux miniers (roches stériles concassées et résidus miniers fins) ont une faible rigidité par rapport au mélange témoin (

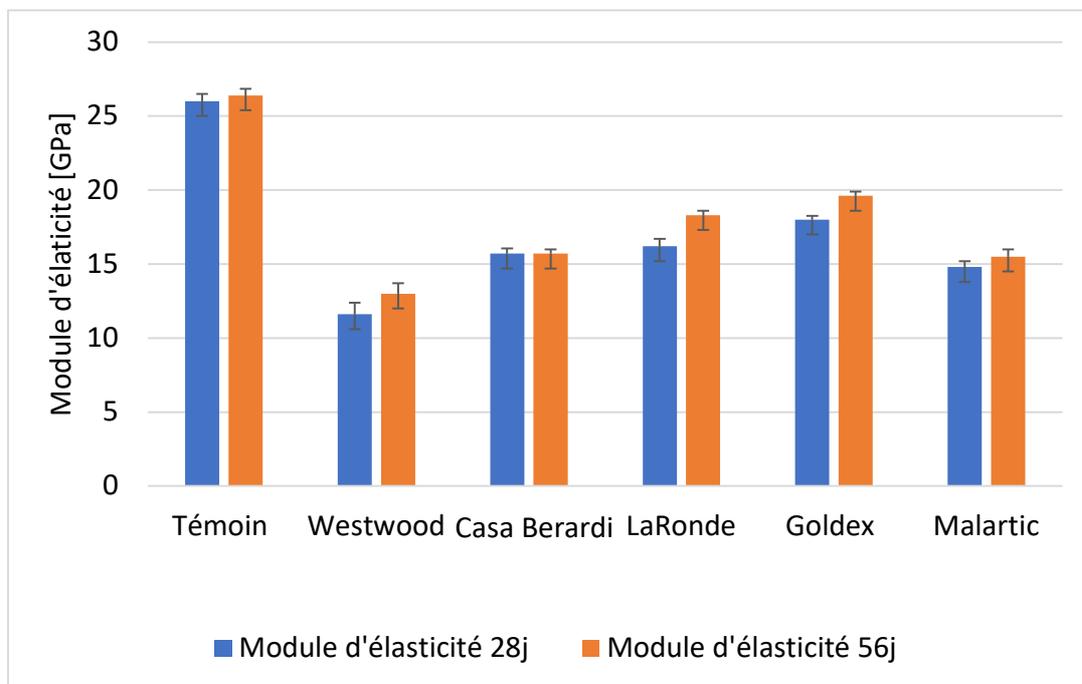


Figure 4-11). Le Tableau 4-10 présente les pourcentages de variation du module d'élasticité et du coefficient de Poisson de tous les mélanges. On remarque que le béton à base de résidus miniers le plus rigide est celui de Goldex. Il a développé des modules d'élasticité plus faibles de l'ordre de 30% (28 jours) et 25% (56 jours) par rapport au témoin. Le mélange Westwood a obtenu les plus faibles modules d'élasticité. Une diminution de l'ordre de 55% (à 28 jours) et 51% (à 56 jours) a été observée comparativement au témoin.

Pour tous les mélanges fabriqués, la variation du module d'élasticité est proportionnelle à celle de la résistance à la compression. Par exemple, les mélanges de les plus performants tels que LaRonde et Goldex ont développé respectivement des modules d'élasticité de 15 et 17 GPa comparable à des UCS de 23 et 25 MPa (28 jours) et de 17 et 19 GPa (56 jours) comparativement à UCS = 26 MPa (56 jours). En revanche, le béton le moins performant tel que Westwood a développé des modules d'élasticité de 11 GPa (28 jours) et 12 GPa (56 jours) comparativement à UCS = 13 MPa (28 jours) et UCS = 15MPa (56 jours).

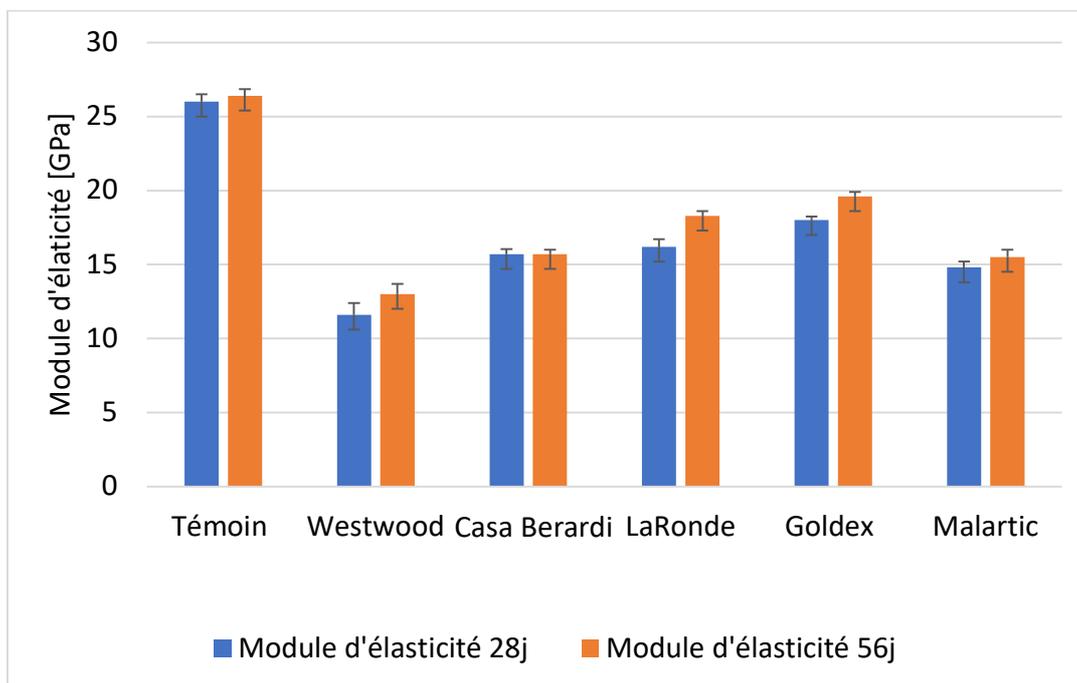


Figure 4-11 : Variation du module d'élasticité en fonction de résidus incorporés dans le béton

Les mélanges Goldex et Westwood ont respectivement développé des valeurs maximales et minimales du coefficient de Poisson par rapport aux autres mélanges à base de matériaux miniers (Figure 4-12). Les coefficients de Poisson des mélanges Casa Berardi, Canadian Malartic, LaRonde et Goldex sont plus élevés que le témoin (28 jours) (Tableau 4-10). Le coefficient de Poisson du mélange Westwood est identique à celui du témoin à 28 jours et 20% plus faible à 56 jours. En revanche, le mélange de béton de Goldex montre une augmentation de 30% et de 10% comparativement au témoin (56 jours).

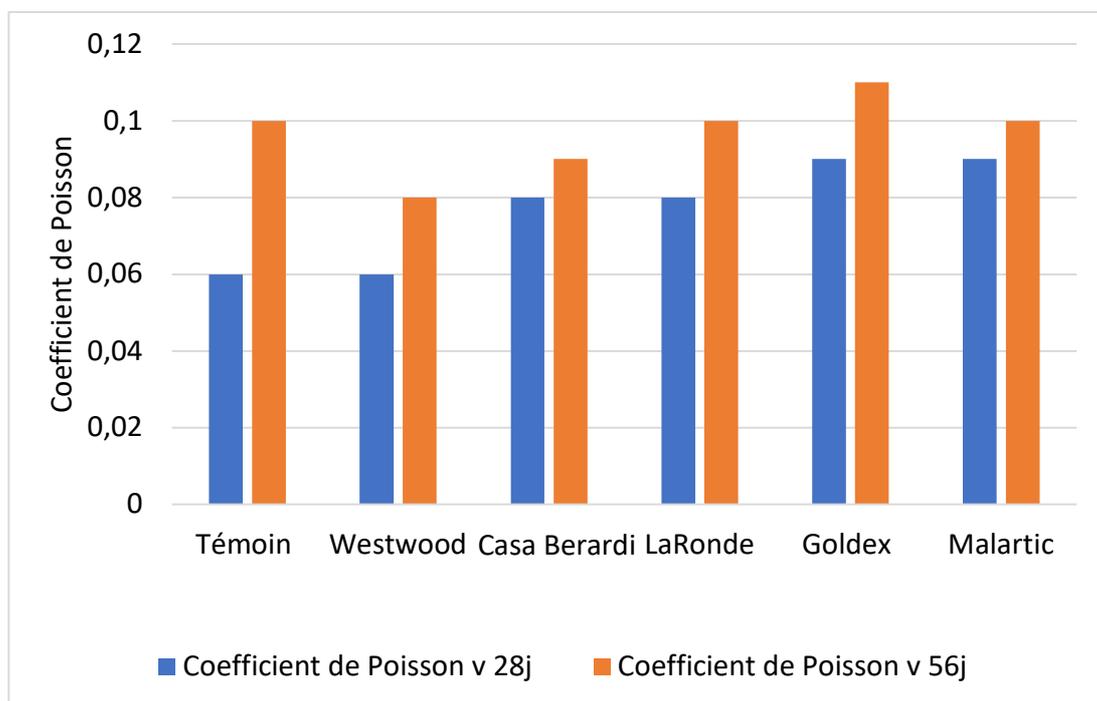


Figure 4-12 : Variation du coefficient de Poisson en fonction des résidus incorporés

Tableau 4-10 : Pourcentage de variation des paramètres mécaniques (module d'élasticité et coefficient de Poisson) par rapport au témoin

Échéance	Module d'élasticité		Coefficient de Poisson	
	28j	56j	28j	56j
<b>Variation %</b>				
Westwood	-55,4	-50,8	0	-20

Casa Berardi	-39,6	-40,5	33,3	10
LaRonde	-37,7	-30,7	33,3	0
Goldex	-30,8	-25,8	-30	-10
Canadian Malartic	-43,1	-41,3	30	0

#### 4.3.2.3 Résultats des observations au microscope électronique à balayage MEB

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées sur des fractures fraîches de béton durci à 28 jours de cure et conservés à l'air libre à une durée variable d'un mélange à l'autre. L'analyse microscopique (MEB) a été appliquée sur des cassures fraîches de béton le plus résistant (Goldex) et le moins résistant (Westwood), et de les comparer avec le béton témoin. Après avoir exécuté les essais mécaniques, la période d'exposition à l'air libre des échantillons était de 69 jours pour le mélange Westwood, 54 jours pour le Témoin et 47 jours pour le mélange Goldex. Cette imagerie MEB vise à déterminer les impacts des variations minéralogiques et granulométriques sur le développement de l'hydratation de la matrice cimentaire fabriquée à base de matériaux miniers (résidus fins de concentrateur et roches stériles concassées).

La microstructure du mélange témoin est illustrée dans la Figure 4-13. Les observations montrent la présence du gel d'hydratation C-S-H (silicate de calcium hydraté), de plaquettes de Portlandite ainsi que des formes d'aiguilles bien développées autour des granulats. Les éléments chimiques Ca, Si, S et Al détectés par l'analyse spectrale élémentaire (EDS) confirment qu'il s'agit d'ettringite (Figure 4-14).

La Figure 4-15 illustre les observations réalisées au MEB de morceaux de béton durcie du mélange Goldex. La microstructure observée est pratiquement la même que celle du témoin. Des observations typiques du gel d'hydratation C-S-H ont été notées. Aussi, partout dans les images

MEB, on remarque la présence de la Portlandite et des aiguilles d'ettringite. Cela a été confirmé par EDS appliqué sur une plaquette de Portlandite et une aiguille d'ettringite (Figure 4-16).

La microstructure de la pâte de ciment durcie du mélange Westwood est illustrée à la Figure 4-17. Les produits d'hydratation observés sont de taille réduite comparativement à la microstructure du mélange Goldex et du témoin. En balayant l'échantillon, on trouve des plaquettes de Portlandite, de gel d'hydratation C-S-H et des petites aiguilles d'ettringite. Aussi, les éléments chimiques Ca, K, Si et Al indiquent la présence du muscovite (Figure 4-18).

L'utilisation des résidus miniers joue un rôle important sur la réaction d'hydratation. Les imageries MEB aident à confirmer les interprétations des résultats des essais mécaniques et à mieux comprendre les impacts de la réutilisation des rejets miniers sur la microstructure et la résistance. On remarque que les faibles propriétés mécaniques obtenues du mélange Westwood correspondent avec les faibles cristallisations des hydrates visualisées sur les photos MEB, en particulier la taille réduite de l'ettringite et la Portlandite. En revanche, les fortes résistances mécaniques du mélange Goldex coïncident avec l'imagerie MEB similaire à celle du mélange témoin qui montre une bonne cristallisation de la Portlandite (plaquettes bien cristallisées) et de l'ettringite (longues aiguilles). Par conséquent, le changement de composition minéralogique des résidus incorporés ainsi que sa nature physicochimique semblent affecter à la fois l'hydratation et le développement des propriétés mécaniques des bétons.

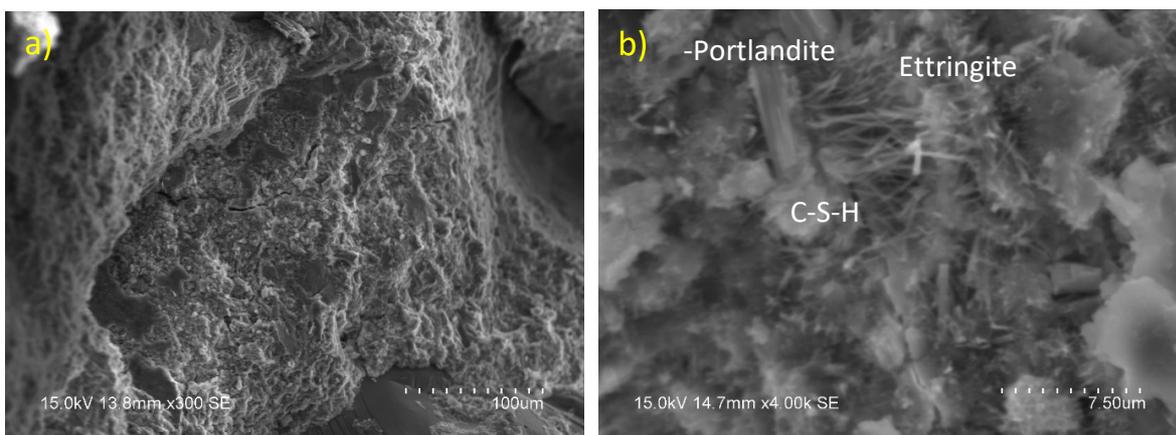


Figure 4-13: Images MEB de la microstructure du mélange Témoin à l'âge de 28 jours

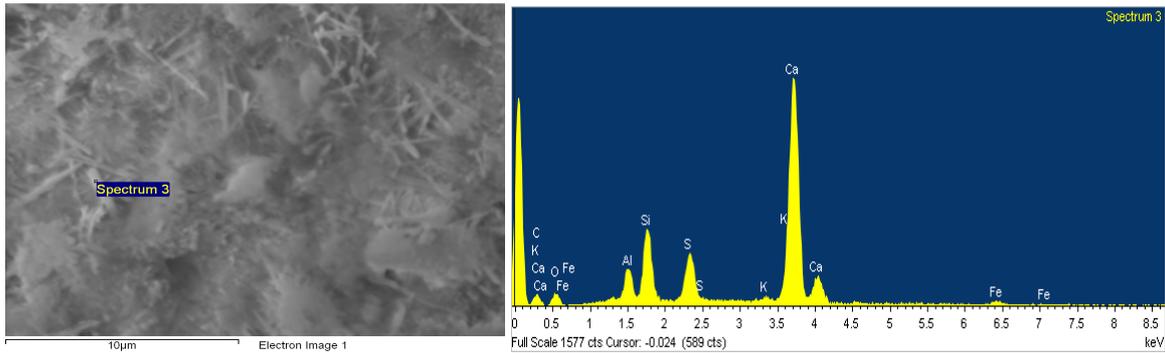


Figure 4-14 : Images d'analyses EDS des aiguilles d'ettringite du mélange Témoin

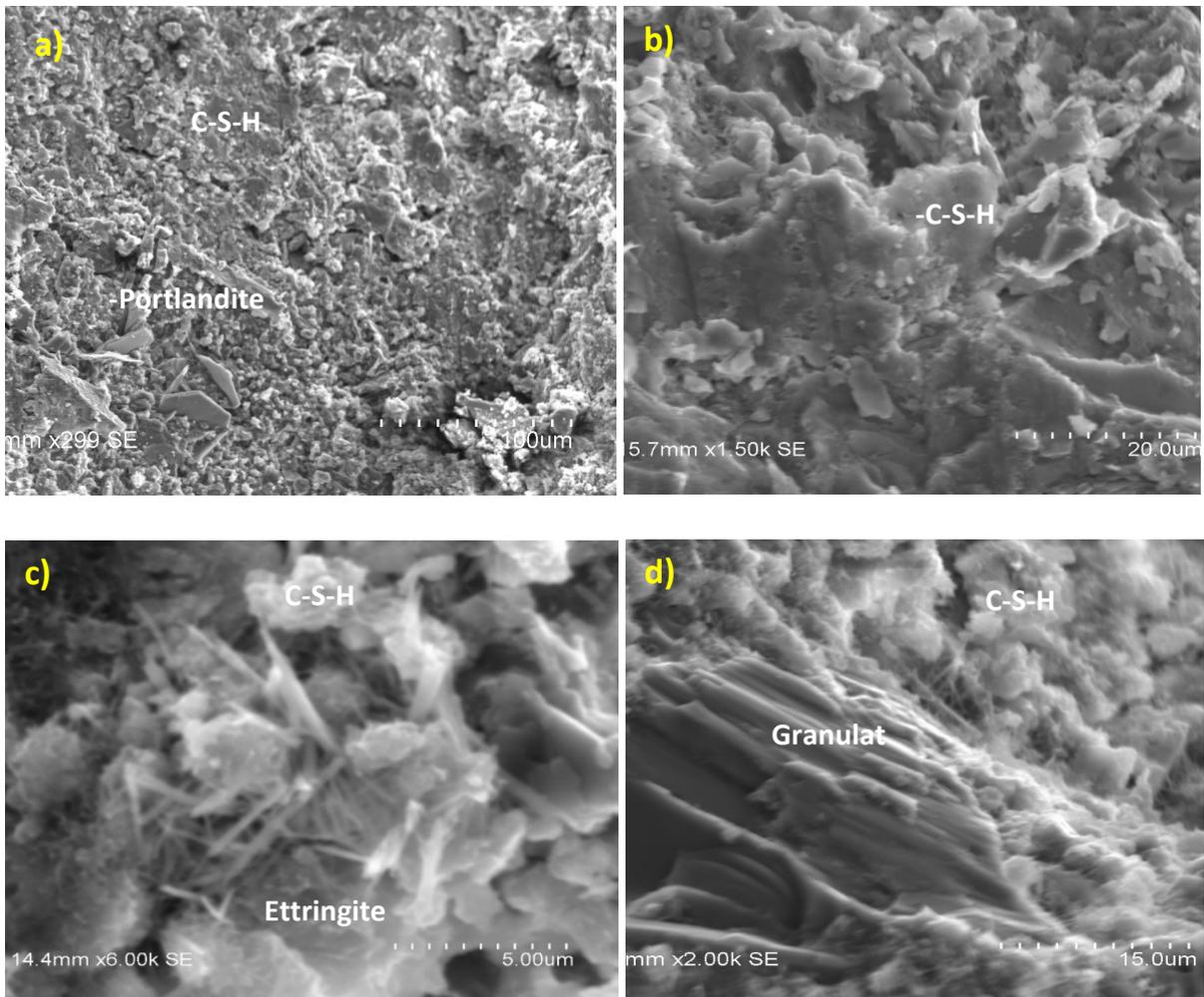


Figure 4-15 : Images MEB de la microstructure du mélange Goldex à l'âge de 28 jours de durcissement

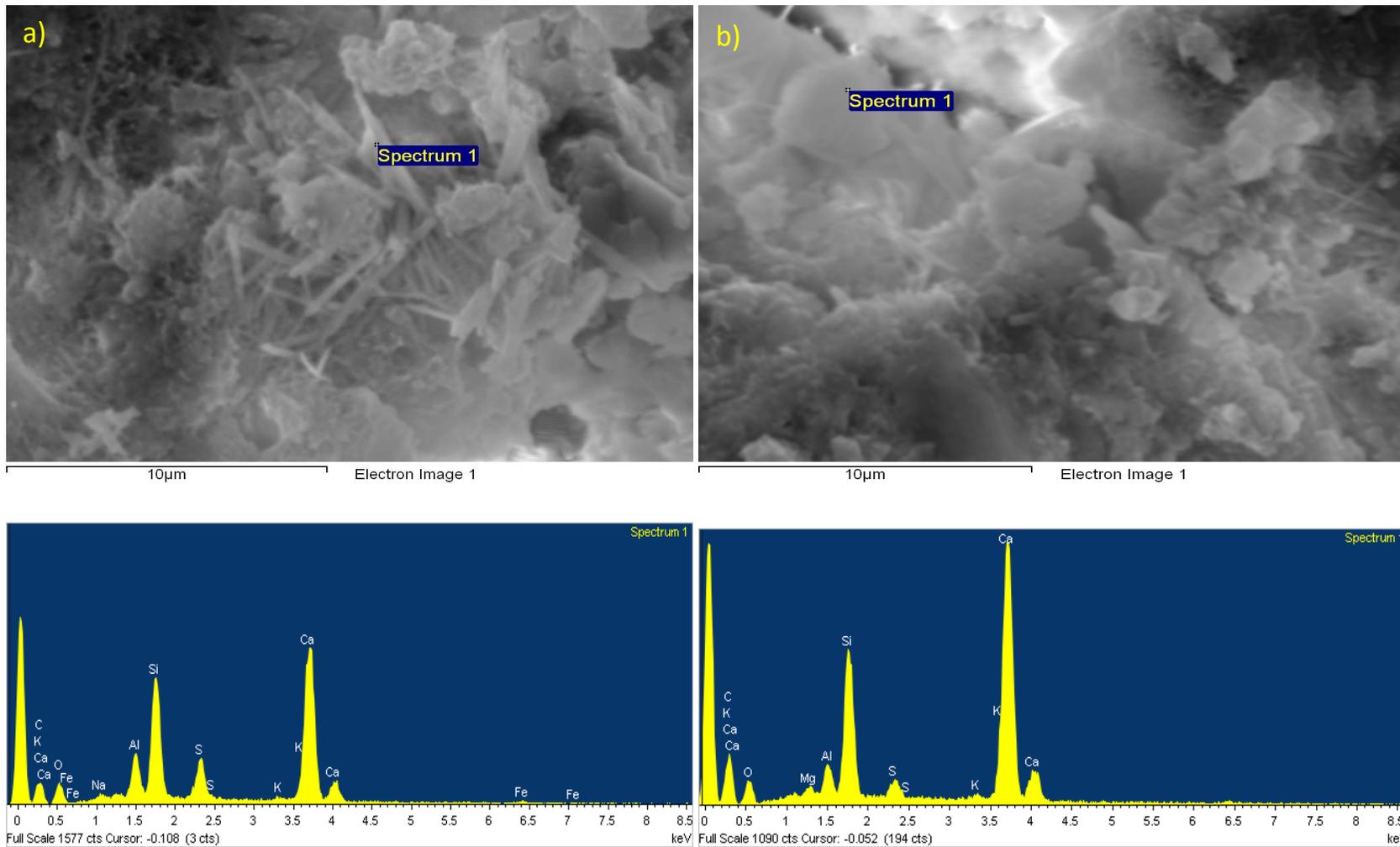


Figure 4-16 : Images d'analyses EDS des aiguilles d'ettringite (a) et du gel d'hydratation C-S-H (b) du mélange Goldex

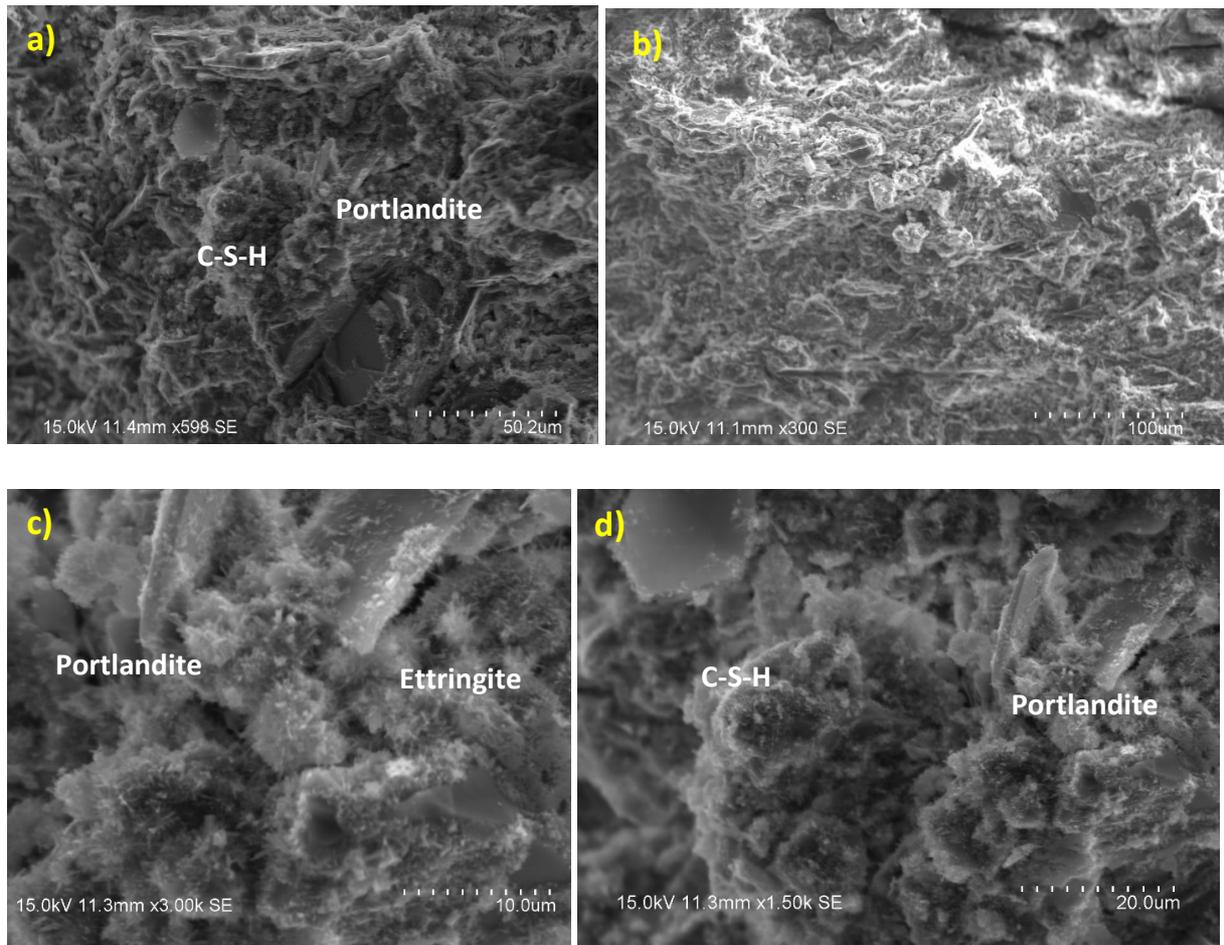


Figure 4-17 : Images MEB de la microstructure du mélange Westwood à l'âge de 28 jours de durcissement

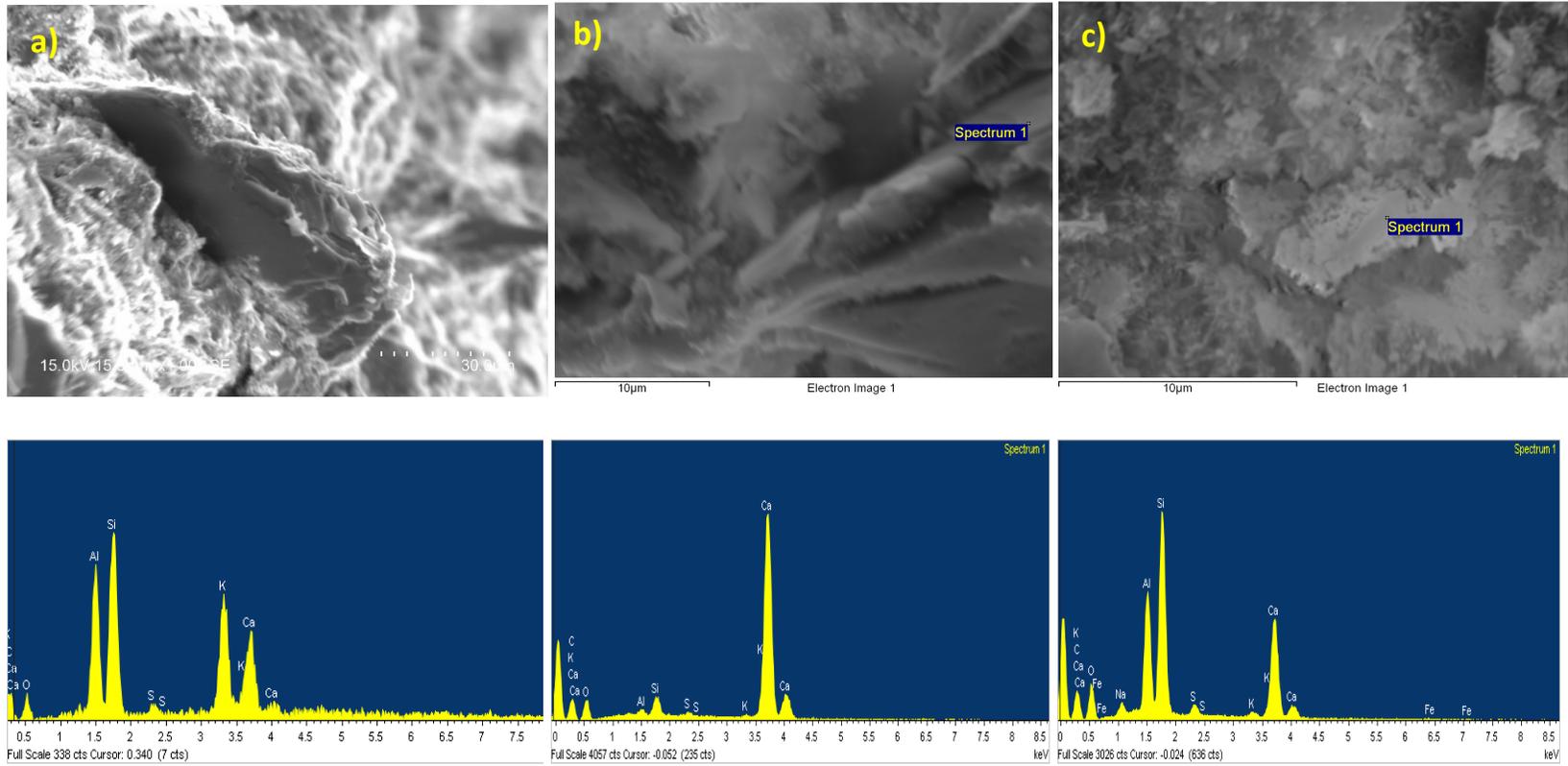


Figure 4-18 : Images d'analyses EDS d'une particule de muscovite (a), des plaques de portlandite (b) et des aiguilles d'ettringite (c) du mélange Westwood

## **Chapitre 5**

### **DISCUSSION DES RESULTATS**

Ce chapitre présente les discussions des résultats obtenus et des comparaisons avec quelques travaux publiés dans la littérature. Ainsi que l'analyse de l'effet du remplacement des matériaux ordinaires par des résidus miniers et des roches stériles concassées sur les propriétés mécaniques et physiques du béton tels que l'UCS, le  $R_t$ , la vitesse d'impulsion ultrasonique, la résistivité électrique  $R$ , le module d'élasticité  $E$  et le coefficient de Poisson et aussi sur la microstructure. De plus, des discussions visent à comprendre les effets de la granulométrie et la minéralogie des différents résidus sur la variation des résistances mécaniques obtenues.

En général, les résultats des essais destructifs et non destructifs exécutés sur des échantillons de mortier et de béton à base de rejets miniers sont très variables. En effet, en utilisant le même type de ciment et les mêmes granulats (roches stériles concassées de Canadian Malartic) dans la composition des mélanges et tandis que nous avons juste varié la source des résidus pour remplacer à 100% le sable, alors les résultats obtenus montrent que ces variations sont reliées à la variabilité des résidus incorporés et par leur composition minéralogique.

#### **5.1 Effet de la granulométrie et de la minéralogie des résidus miniers**

Chaque mine applique des modes de broyage différents et des mailles de libération dépendant de la zone de minéralisation et de la teneur du minerai. La composition minéralogique et la granulométrie des rejets miniers changent d'une mine à l'autre. Par ailleurs, nous avons noté cinq comportements différents qui varient selon la source des résidus. De tels résultats pourraient être liés aux compositions variables des résidus miniers de LaRonde, Goldex, Westwood, Canadian Malartic et Casa Berardi dont les résidus ont une fine granulométrie (50% de volume  $\leq 40 \mu\text{m}$ ) et une diversité minéralogique avec des teneurs élevées en sulfures (entre 7 et 17%). Dans notre cas, en utilisant les mêmes matériaux miniers comme les résidus de LaRonde (Belem et al., 2010), les mortiers et les bétons fabriqués ont été aussi influencés par cette variabilité. Aussi, les

mélanges cimentaires à base des résidus ayant la plus fine granulométrie (Westwood par exemple) avaient les plus faibles résistances mécaniques.

## 5.2 Effet d'augmentation du rapport E/C sur la résistance à la compression des mortiers incorporant des résidus miniers

L'augmentation de la quantité d'eau du mélange de mortier incorporant des résidus miniers joue un rôle important sur le développement des résistances. Dans ce contexte, Argane et al. (2015) ont travaillé sur le remplacement de 100% de sable par des résidus miniers pour la fabrication des mortiers. Avec des résidus miniers ayant  $D_{60} = 140 \mu\text{m}$  et  $480 \mu\text{m}$ , les auteurs ont utilisé un rapport E/C égal à 1,35. Ils ont trouvé des résistances à la compression uniaxiale entre 8,5 et 13,8 MPa (28 jours). Aussi, Belem et al. (2010) ont rapporté des résultats de valorisation des résidus miniers de LaRonde (44% des grains de résidus avaient un diamètre inférieur à  $20 \mu\text{m}$ ) pour le remplacement total du sable (100%) dans le mortier. En appliquant un ratio E/C = 0,5, les auteurs ont obtenu une résistance à la compression de 26 MPa à 28 jours de durcissement. Comparativement à nos résultats, la Figure 5-1 montre l'influence du choix du rapport E/C sur la variation des résistances à la compression obtenues. L'augmentation du rapport E/C de 0,8 à 1,3 réduit les résistances à la compression de tous les mélanges après 28 jours de durcissement. La formulation M1 (rapport E/C= 0,8) donnait des meilleurs résultats comparativement à la formulation M2 (E/C = 1,3). Une augmentation de l'ordre de 60% est notée de la formulation M2 par rapport à M1 du mélange avec les résidus de Canadian Malartic. Le mélange LaRonde avait un pourcentage minimal de 28% d'augmentation des résistances à la compression entre les deux formulations.

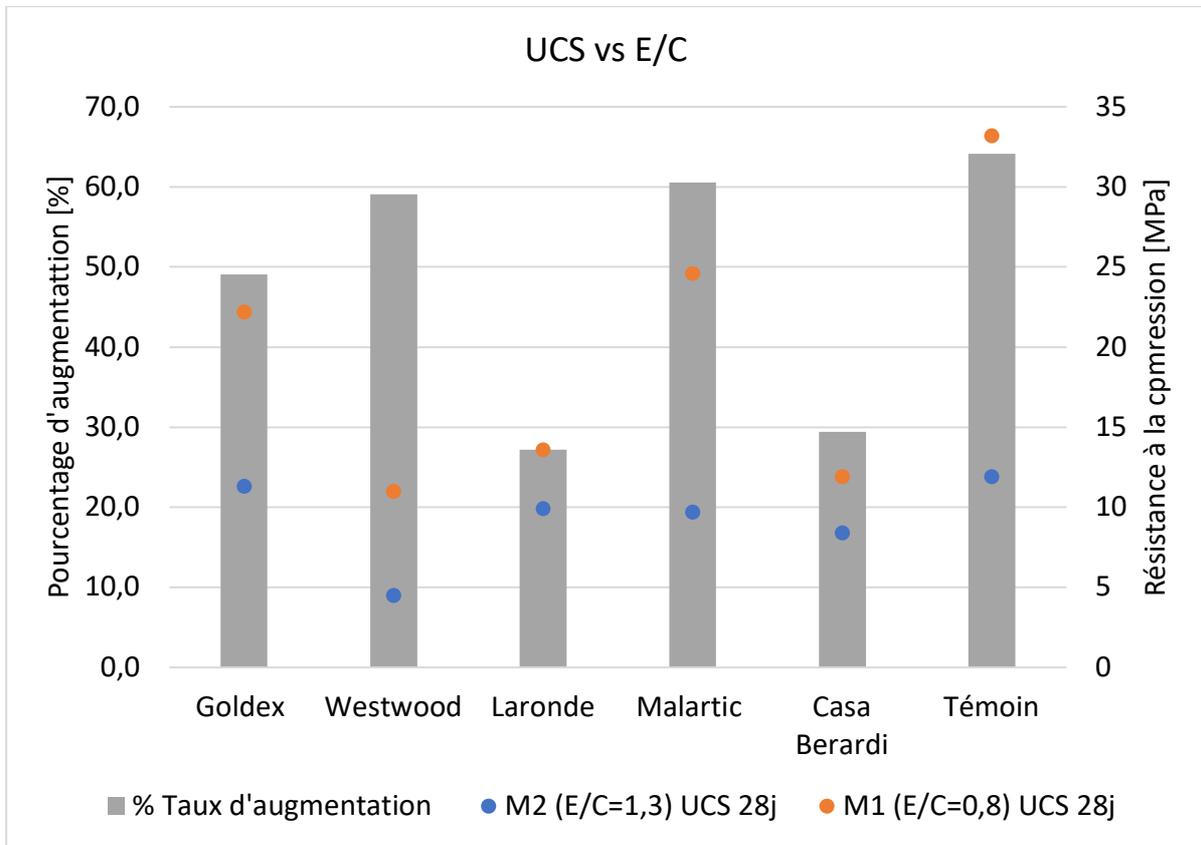


Figure 5-1 : Relation entre les résistances à la compression et l'augmentation du rapport E/C des mortiers

### 5.3 Relation entre la résistance à la compression et l'affaissement du béton

En comparant l'affaissement des mélanges de béton à leurs états frais et les résistances à la compression mesurés des mélanges Goldex et LaRonde, une ouvrabilité plastique de 76 mm et autre fluide de 164 mm a été trouvée. Les UCS des deux mélanges étaient légèrement différents à 28 jours et similaire à 56 jours d'une valeur de 26 MPa (Tableau 5-1). Une étude antérieure réalisée par Belem et al. (2010) a documenté que la fabrication du béton composite (remplaçant 100% du sable par des résidus de LaRonde) en appliquant un ratio E/C = 0,5 et un affaissement de 200 mm, la résistance à la compression obtenue était de 26 MPa à 28 jours de durcissement. En revanche, le mélange Westwood avait le même affaissement que celle de LaRonde, mais il a eu des résistances à la compression à 28 et 56 jours considérablement plus faibles que LaRonde

(Figure 5-2). Cette variabilité pourrait être reliée à la nature minéralogique et à la fine granulométrie des différents résidus miniers incorporés pour remplacer le sable (Benzaazoua et al., 2000 ; Benzaazoua et al., 2005).

Une comparaison entre la variation des certains paramètres des résidus miniers tels que la teneur en sulfures, la teneur en muscovites et la médiane des courbes granulométriques ( $D_{50}$ ) confirme que chaque type de résidus possède ses propres paramètres physicochimiques (Tableau 5-1). Donc, dans une matrice cimentaire, il est difficile de prédire le comportement mécanique et physique de béton et/ou mortier fabriqués en remplaçant les matériaux conventionnels par des résidus miniers et/ou des roches stériles. Aussi, à travers les essais mécanique et physique employés, il est difficile de préciser lequel des paramètres affecte le plus le développement des résistances d'une matrice cimentaire à base de rejets miniers au cours du temps.

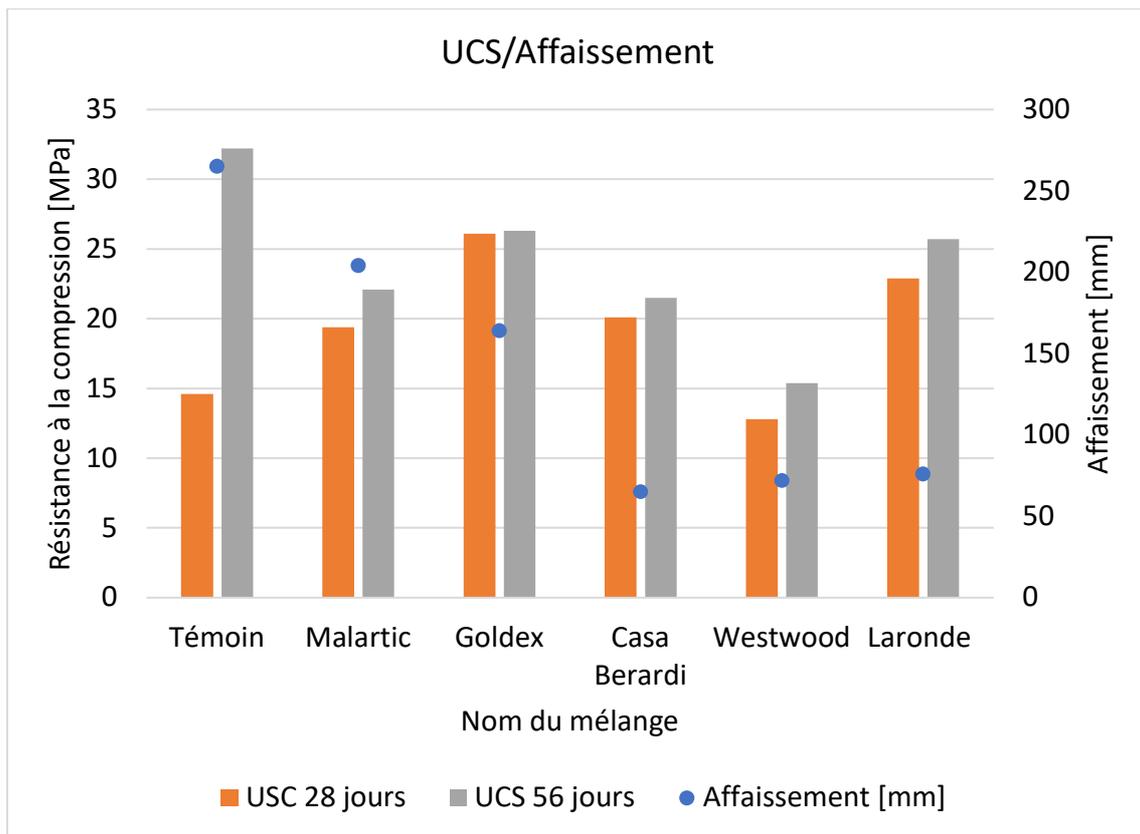


Figure 5-2 : Relation entre la résistance à la compression et l'affaissement du béton

Tableau 5-1 : Comparaison de quelques caractéristiques minéralogiques et granulométriques sur la variation des résistances à la compression et l'affaissement

	UCS [MPa]		Affaissement [mm]	Teneur en muscovite [%]	Teneur en sulfures [%]	D <sub>50</sub> [µm]
	28 j	56 j				
Age						
Témoin	14,6	32,2	265	----	----	800
Westwood	12,8	15,4	72	0,66	7,6	28
Casa Berardi	20,1	21,5	65	20,3	9	15
LaRonde	22,9	25,7	76	0,13	17,14	55
Goldex	26,1	26,3	164	4,4	----	30
Canadian Malartic	19,4	22,1	204	-----	----	20

#### 5.4 Effet de l'incorporation des rejets miniers sur les propriétés élastiques du béton

L'utilisation des rejets miniers pour le remplacement des matériaux standards réduit la rigidité et l'élasticité. Le taux de diminution est de l'ordre de 30 à 65% par rapport au Témoin. Aussi, des variations proportionnelles du module d'élasticité et des vitesses d'impulsions ont été trouvées selon les courbes. Une vitesse minimale de 3900 m/s et maximale de 4500 m/s sont notées respectivement pour le mélange Westwood et Goldex (Figure 5-3). Ces vitesses élevées suggèrent que les bétons fabriqués ont une faible porosité. Donc, la fine granulométrie des résidus permettrait de combler presque tous les vides dans la matrice cimentaire, mais malgré cette texture compacte les bétons à base des rejets miniers avaient une élasticité plus faible que le témoin.

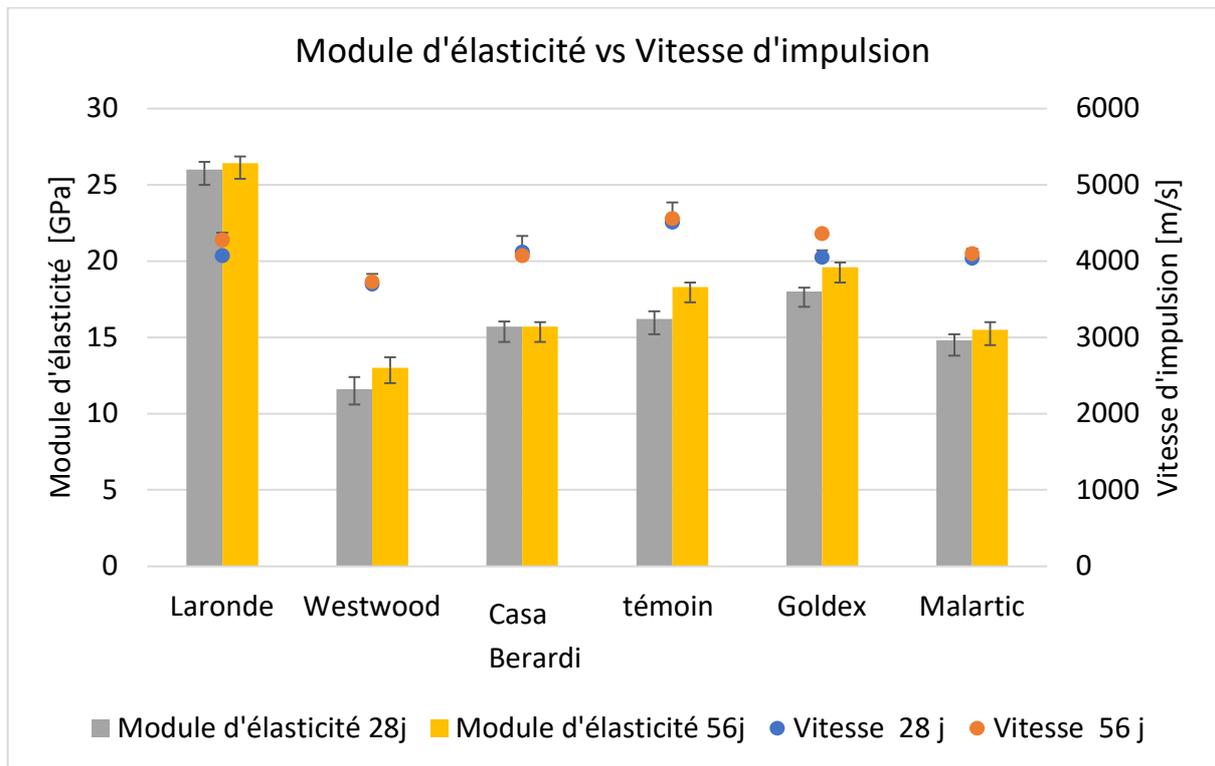


Figure 5-3 : Relation entre le module d'élasticité (E) et la vitesse d'impulsion ultrasonique

### 5.5 Effet de remplacement du sable par les résidus et les granulats par les roches stériles concassées sur la microstructure

Des observations au MEB ont permis de visualiser la microstructure de la pâte de ciment incorporant des rejets miniers. La réutilisation des résidus miniers et des roches stériles concassées pour remplacer le sable et les granulats a modifié la réaction d'hydratation. Cela a été interprété en comparant trois observations microscopiques réalisées sur des fractures fraîches de béton durci à 28 jours du témoin et des mélanges de béton Goldex et Westwood.

Les microstructures des mélanges incorporant des résidus miniers de Goldex et Westwood montrent que les précipitations des hydrates se changent en variant la source des résidus et les lors du durcissement. Cela montre que la physicochimie jouerait un rôle sur la microstructure ainsi que sur les propriétés mécaniques. Par conséquent, dans une matrice cimentaire, le changement de composition des résidus incorporés affecte la réaction d'hydratation entre les microparticules (inférieur à 20 µm), le ciment et l'eau de gâchage.

## 5.6 Intérêt économique et environnemental

Une fois que l'exploitation des minerais n'atteint plus les seuils de rentabilité, l'industrie minière procèdera à la fermeture de la mine. Un plan de réaménagement et de restauration du site doit être approuvé par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. Un montant de garantie financière doit être déposé pour couvrir tous les coûts des travaux et remettre les sites miniers dans un état satisfaisant. Cela demande beaucoup des ressources financières et matérielles, particulièrement les ressources granulaires (les matériaux conventionnels). Par ailleurs, la réutilisation des résidus miniers et des roches stériles comme des matériaux de construction représente une solution avantageuse.

Des quantités énormes de rejets solides pourraient être recyclées dans des formulations cimentaires pour des applications minières, conception des structures temporaires, restauration des sites et le remblayage des chantiers souterrains. Par conséquent, l'industrie minière pourrait économiser à la fois les frais de taxation et de traitement des résidus et aussi bien le coût des travaux à effectuer. Cette approche permet la réduction des impacts environnementaux et va dans le sens de la mise en œuvre des recommandations faites par le Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) qui encourage les compagnies minières à valoriser les résidus issus de l'exploitation pour la restauration de leur site et pour d'autres applications potentielles.

## Chapitre 6

### CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La possibilité de concevoir un béton avec des matériaux miniers locaux paraît particulièrement intéressante dans la mesure où ce béton acquiert des propriétés mécaniques comparables à celles d'un béton conventionnel. Le développement technologique de la fabrication des bétons par la valorisation de nouveaux matériaux a permis de trouver des formulations de béton plus approprié notamment pour certains travaux miniers.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche contribuent à évaluer le potentiel de remplacement des matériaux standards par des rejets miniers. Cette méthode de valorisation permettra de comprendre les effets de ce remplacement. Le but principal de ce projet de recherche était d'évaluer le potentiel de valorisation des rejets miniers dans des mélanges cimentaires (béton et mortier). Par ailleurs, des formulations ont été développées en remplaçant 100% du sable et des granulats par des résidus miniers et des roches stériles concassées tout en variant la source des résidus incorporés. Les matériaux miniers ont été utilisés à leur état brut sans appliquer aucun traitement spécifique.

Tout d'abord, des analyses minéralogiques et granulométriques ont été réalisées sur les résidus miniers de différentes mines tels que les mines LaRonde, Casa Berardi, Westwood, Canadian Malartic et Goldex. Les résultats ont montré que chaque type de résidus possède ses propres caractéristiques. Une minéralogie présentant des teneurs variables en sulfures (entre 7 et 17%), carbonates (entre 8 et 47%), silicates (entre 25 et 66%) a été observée. Aussi, une granulométrie fine composée par 40% de résidus inférieur à 20  $\mu\text{m}$  a été déterminée, les tailles des particules des résidus miniers variant entre 0,3 et 350  $\mu\text{m}$ . Les résidus miniers ont des granulométries très fines et une composition minéralogique variable ayant des teneurs élevées en sulfures comme la pyrite (ex. 17% pour LaRonde) et de phyllosilicates comme la muscovite (ex. 20% pour Casa Berardi - Casa Berardi).

Les roches stériles concassées de la mine Canadian Malartic ont été préparées comme granulats grossiers avant d'être utilisées dans la fabrication de béton. Les granulats conservés avaient des dimensions de 5 à 20 mm pour le remplacement des granulats ordinaires. Les essais de caractérisation des roches stériles ont indiqué une bonne résistance à l'usure ( $MD = 3.9\%$  obtenu à l'aide de l'essai Micro-Deval) et une très bonne résistance à la compression, soit une moyenne de 200 MPa tel qu'estimée par l'essai de double poinçonnement.

Les résistances à la compression des bétons incorporant des rejets miniers sont proches de celle du Témoin. Aussi, dans certains cas, les résistances à la traction des mélanges à base des rejets miniers dépassent celle du Témoin. Selon les résultats, les résistances à la compression moyennes à 56 jours de durcissement des bétons incorporant des rejets miniers variaient entre  $UCS = 15,4$  MPa (Westwood) et 26,3 MPa (Goldex) comparativement au témoin qui enregistrait 32,2 MPa. Pour les résistances à la traction, une valeur minimale de  $R_{t\text{ Westwood}} = 1,8$  MPa et une valeur maximale de  $R_{t\text{ Goldex}} = 3,1$  MPa comparativement à un  $R_{t\text{ témoin}} = 2,7$  MPa. Aussi, les résistances à la compression uniaxiale des cubes de mortier montrent que les propriétés mécaniques obtenues dépendent de la quantité d'eau dans la formulation. Une diminution de l'ordre de 29% à 65% est notée des mélanges préparés selon la formulation M2 ( $E/C=1,3$ ) par rapport à M1 ( $E/C=0,8$ ). Donc, il semble que la finesse des résidus miniers agit sur l'hydratation des mélanges de mortier et par conséquent elle affaiblit les résistances à la compression.

Les valeurs de module d'élasticité et de coefficient de Poisson indiquent que le béton à base des rejets miniers serait moins rigide par rapport au Témoin avec des taux de diminution de 25 à 55% à 56 jours de durcissement. Ces résultats sont relativement intéressants pour l'industrie minière parce qu'ils permettront d'effectuer plusieurs types de travaux sur sites en utilisant les matériaux locaux.

La microstructure observée au MEB sur des échantillons de béton durcie à 28 jours des mélanges Goldex, Westwood et Témoin montrent que l'hydratation semble être affectée par l'incorporation des matériaux miniers dans la composition du béton. Des faibles cristallisations des hydrates (Portlandite et ettringite) ont été observées en balayant les images MEB de Westwood. Des observations microscopiques opposées ont été observées en examinant le

mélange Goldex. La Portlandite et le gel d'hydratation C-S-H ont été bien cristallisées, ces formes d'hydratation sont similaires que l'imagerie MEB du mélange Témoin. On rappelle que le mélange Westwood avait toujours les résistances mécaniques les plus faibles. En revanche, le mélange Goldex avait des résistances les plus élevées par rapport aux restes de mélanges fabriqués.

Les résultats suggèrent quelques recommandations afin de mieux étudier les effets de la réutilisation des rejets miniers dans une matrice cimentaire et d'améliorer la pertinence de cette méthode de valorisation.

- Réutilisation des particules fines de taille [2 à 5 mm] qui ont été éliminées lors de la préparation des granulats de roches stériles concassées. Cela pourrait améliorer la courbe granulométrique des résidus et ainsi apporter des améliorations de résistance et de durabilité ;
- Étudier le comportement des mélanges de béton en ajoutant des adjuvants (ex. superplastifiant) ;
- Réalisation d'essais de lixiviation du béton ou mortier à base des résidus miniers pour évaluer sa résistance à la dégradation chimique par l'attaque d'eau ;
- Étudier la durabilité du béton à base de matériaux miniers : RAG, attaque sulfatique, écaillage, cycles gel/dégel.

## Références

- Aitcin, P.-C. (2003). Cours des liants hydrauliques : Le ciment du béton (version 2003).
- Ahmari S., Zhang L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization, 323-331.
- Annor A. (1999). A study of the characteristics and behaviour of composite backfill material. Ph.D. thesis, McGill University, Montreal.
- Argane R., Benzaazoua M., Hakkou R., Bouamrane A. (2015). Reuse of base-metal tailings as aggregates for rendering mortars: Assessment of immobilization performances and environmental behavior, 38-44.
- Arioglu E. (1984). Design aspects of cemented aggregate fill mixes for tungsten stoping operations. *Min. Sci. Technol.*1: 209–214.
- Aubertin M., Bussière B., Bernier L., Chapuis R., Julien M., Belem T., Simon R., Mbonimpa M., Benzaazoua M., Li L. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement.
- BAPE (2009). Projet minier aurifère : Canadian Malartic. Rapport d'enquête et d'audience publique, 935-941.
- Belem T., Benzaazoua, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie I : de sa fabrication à sa mise en place sous terre. *Après-mines 2003*, "Impacts et gestion des risques : besoins et acquis de la recherche." 5–7 February 2003, Nancy. GISOS, CD-ROM, 12 pages.
- Belem T., Bussière B., Chtaini Y., Rohit K.C. (2010). Use of mine tailings as raw material in concrete and mortar mix proportioning. *Proceedings of 63th Canadian Geotechnical Conference - GEO2010*, Calgary, Alberta, Canada, 12-16 sept. 2010, pp. 1410-1425.

- Belem, T. (2009) Développement D'une Méthode Intégrée D'analyse de Stabilité Des Chantiers Miniers Remblayés. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) Report No R-622, Quebec, pp. 1-97.
- Belem T. & Benzaazoua M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotech Geol. Eng.* 26:175.
- Belem, T., El Aatar, O., Benzaazoua, M., Bussière, B. Yilmaz, E. (2006) Characterization of SelfWeight Consolidated Paste Backfill. The 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings 333–45.
- Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M. (2002) The Effect of Microstructural Evolution on the Physical Properties of Paste Backfill. *Tailings and Mine waste'01*, January 16-19, Fort Collins, Colorado, Balkema: Rotterdam, pp. 365–374.
- Benzaazoua M., Belem T., Bussière B. (2002). Chemical aspect of sulfurous paste backfill mixtures. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 (7), pp. 1133–1144.
- Benzaazoua M., Fall M. et Ouellet S. (2004). Étude pluridisciplinaire visant à mettre au point un outil expert pour la prédiction du comportement des remblais en pâte, 11 pages ;
- Benzaazoua M., Ouellet J., Servant S., Newman P., Verburg R. (1999). Cementitious mine backfill with high sulfur content: physical, chemical and mineralogical characterization.
- Benzaazoua M., Belem T., Ouellet S. et Fall M. (2013). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II : comportement à court, à moyen et à long terme. Colloque Après-mines 2003, Nancy, 5-7 février 2003, Groupement de Recherches sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, 12 pages.
- Benzaazoua M., Fiset J.-F., Bussière B., Villeneuve M., & Plante B. (2006). Sludge recycling within cemented paste backfill: Study of the mechanical and leachability properties. *Minerals engineering*, 19(5), 420-432.

- Benzaazoua, M., Belem, T., Jolette, D. (2000) Investigation de La Stabilité Chimique et Son Impact Sur La Qualité Des Remblais Miniers Cimentés. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) R-260, Montréal (Québec), pp. 1-172.
- Benzaazoua, M., Bois, D., Belem, T., Gauthier, P., Ouellet, S., Fall, M., St-Onge, J.-F. (2005) Remblais souterrains, évolution des connaissances et de la pratique, 1–23.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., Verburg, R. (1999) Cementitious mine backfill with high sulfur content: physical, chemical and mineralogical characterization. *Cement and Concrete Research* 29(5):719–25.
- Chou C.L., Chouteau M., Benzaazoua M. (2012). Laboratory characterization of mining cemented rock fills by NDT Methods, *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, 935-941.
- Dorricott M.G., Grice A.G. (2002). Backfill, the environmentally friendly tailings disposal system. 265–270.
- Farsangi P.N., Hayward A.G., Hassani F.P. (1996). Consolidated rockfill optimization at Kidd Creek Mines. *CIM Bull* 89:129–134.
- Fall, M., Benzaazoua, M., Ouellet, S. (2005) Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. *Minerals Engineering* 18(1):41–44.
- Grice T. (1998). Underground mining with backfill. *Proceedings of the 2nd Annual Summit-Mine Tailings*, 181-186.
- Hane H., Belem T., Benzaazoua M., Maqsoud A. (2017). Laboratory Characterization of Cemented Tailings Paste Containing Crushed Waste Rocks for Improved Compressive Strength Development, 19 pages.
- Ince C. (2019). Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus, 11 pages.
- Inventaire National des Rejets de Polluants (INRP) (2015). Guide de déclaration à l’Inventaire national des rejets de polluants 2014 et 2015, 70 p.

- Kesimal, A., Yilmaz, E., Ercikdi, B., Alp, I., Deveci, H. (2005) Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill. *Materials Letters* 59(28):3703–9.
- Kintzel R. (2005). CAF backfill of primary stopes at Callie underground mine. *Aust Inst Min Metal*, 12 pages.
- Lapointe U. (2020). Mine Waste in Canada, A Growing Liability Mining. *Mining Watch Canada*, 17 p.
- Leahy F.J., Cowling R. (1978). Stope fill developments at Mount Isa. *Proceedings of the Twelfth Canadian Rock Mecanics symposium on Mining with Backfill*, 11 pages.
- Mayes W. M., Potter H. A., Jarvis A. P. (2009). Novel approach to zinc removal from circum-neutral mine waters using pelletised recovered hydrous ferric oxide. *Journal of hazardous materials*, 162(1), 512-520.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), (2014). Lignes directrices relatives à la valorisation des résidus miniers, Québec, numéros ISBN 978-2-550-72712-5 ,17 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), (2015). Données révisées déclarées par les installations « IRNP», 16 pages.
- Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP), (2012). Guide de recyclage des matières résiduelles fertilisantes : Critères de référence et normes réglementaires, ISBN 978-2-550-64355-5, 170 pages.
- Natural Resources Canada (2019). Mining Sector Performance Report 2008-2017, Energy and Mines Ministers' Conference, Cranbrook, British Columbia, July 2019, 80 p.
- Ouellet S. et Chouteau M. (2008). La résistivité électrique et la sismique appliquées à l'étude des comportements mécaniques, géotechniques et environnementaux des remblais cimentés en pâte, 21 pages.

- Plante B. (2010). Évaluation des principaux facteurs d'influence sur la prédiction du drainage neutre contaminé. Thèse de doctorat, Université du Québec à en Abitibi-Témiscamingue.
- Ritcey G. (2005). Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*. 78. 3-20. 10.1016/j.hydromet.2005.01.001.
- Tagnit Hamou, A. (1995). Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons.
- Tagnit-Hamou, A. (2013). Les liants hydrauliques : GCI710
- Şenyur G. & Erer D. (1990). Cement stabilization of crushed aggregate: analysis of the properties related to curing time, *Mining Science and Technology*, Volume 10, Issue 3, 1990, 315-321, ISSN 0167-9031
- Verkerk CG, Marcus RD (1988). The pumping characteristics and rheology of paste fills. *Backfill in South African Mines*. SAIMM, Johannesburg, 221–233.
- Wang, C. & Villaescusa, E. (2000). Backfill research at the Western Australian school of mines. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*. 735-743. 10.1016/S0218-1940(00)00036-5
- Yu T.R., Counter D.B. (1983). Backfill practice and technology at Kidd Creek Mines. *CIM Bull* 76(856):56–65.
- Yu T.R., Counter D.B. (1988) Use of fly ash in backfill at Kidd Creek mines. *Can Inst Min Metall. Bull*. 81(909):44–50.