



GEO Québec
2015

Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud

Mise en évidence expérimentale du dosage optimal des ciments composés (liants) utilisés dans la fabrication des remblais en pâte cimentés

Amal Sahi, Tikou Belem & Mostafa Benzaazoua
IRME, UQAT, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

ABSTRACT

Physicochemical parameters were proposed recently for the characterization of binding agents and their relative reactivity in cemented paste backfill (CPB). This was hydraulic modulus (Hm_b), the reactivity factor (Rf_b) and the relative hydration index (H_a) of binders. The relative hydration index quantifies the hydraulic activity of a given binder. The specific objective of this study is to experimentally verify the consistency and validity of these physicochemical parameters for use on a routine basis. To achieve this goal, different CPB mixtures were prepared using four categories of binding agents: general use Portland Cement (GU), slag-based binders (GU/Slag), class F fly ash-based binders (GU/FA-F) and class C fly ash-based binders (GU/FA-C). For each CPB mixture two binder percentages were used: 4.5% and 7% by dry mass of tailings. The uniaxial compressive strength (UCS) of CPB specimens was determined at four different curing times: 14, 28, 56 and 90 days. The results of this study show that CPB mixtures having a relative hydration index equivalent to that of the binder said reference binder (20GU/80Slag) developed the highest UCS value (= optimum value) among their category of mixtures. Consequently, the optimum dosage based on the physicochemical parameters has been demonstrated and validated experimentally. Therefore, it's believed that these parameters can be used as a screening tool of binders and/or when changing a binding agent and determining its optimal dosage for CPB preparation.

RÉSUMÉ

Des paramètres physico-chimiques ont été proposés récemment pour la caractérisation des agents liants ainsi que de leur réactivité relative dans les remblais miniers en pâte cimentés (RPC). Il s'agissait de modules hydrauliques (Hm_b), du facteur de réactivité relative (Rf_b) et de l'indice d'hydratation relative (H_a) des agents liants. L'indice d'hydratation relative permet de quantifier l'activité hydraulique d'un liant donné. Cette étude a pour objectif spécifique de vérifier expérimentalement la cohérence et la validité de ces paramètres physico-chimiques en vue de leur utilisation sur une base routinière pour prédire les performances de RPC. Pour atteindre l'objectif visé, différentes recettes de mélanges de RPC ont été préparées avec quatre catégories d'agents liants : ciment Portland à usage courant (GU), liants à base de slag (GU/Slag), liants à base de cendres volantes de classe F (GU/FA-F) et de classe C (GU/FA-C). Pour chaque recette de RPC deux pourcentages de liant ont été utilisés : 4,5% et 7% de la masse de résidus secs. La résistance à la compression uniaxiale (UCS) des éprouvettes de RPC a été déterminée à quatre temps de cure : 14, 28, 56 et 90 jours. Les résultats de l'étude montrent que les recettes des mélanges ayant un indice d'hydratation relative équivalent à celui du liant dit de référence (20GU/80Slag) ont développé les résistances les plus élevées (optimum) dans leur catégorie de recette. Par conséquent, le dosage optimal via les paramètres physico-chimiques a pu être mis en évidence et validé expérimentalement. Ces paramètres peuvent donc être utilisés comme outil d'aide à la présélection et/ou lors du changement d'un agent liant et à son dosage optimal dans la fabrication des remblais miniers en pâte cimentés.

1 INTRODUCTION

L'utilisation du remblai en pâte cimenté (RPC) est devenue une technique très répandue dans les mines Canadiennes et à travers le monde en raison des réglementations environnementales plus strictes sur la gestion des résidus miniers en surface. De nombreux chercheurs ont mis en évidence les avantages potentiels liés au remblai en pâte cimenté dans les opérations minières et l'ont jugé indispensable pour la plupart des mines souterraines (Benzaazoua et al. 1999, 2002, Belem et al. 2000, Hassani et al. 2001). Les principaux avantages de cette technique sont : l'amélioration de la stabilité dans les chantiers et par conséquent le renforcement de la sécurité des travailleurs (Benzaazoua et al. 1999), l'enfouissement de quantités importantes de résidus miniers souvent sulfureux (jusqu'à 50%), donc la

réduction du volume des résidus problématiques à stocker en surface (Hassani et Archibald 1998), et l'augmentation des réserves exploitées en agissant comme pilier secondaire (Hassani et Archibald 1998; Belem et al. 2001).

Le RPC est un mélange des rejets de concentrateur filtrés, d'un agent liant (avec une proportion variant entre 2% et 7%) et d'eau de mélange. Le remblai en pâte cimenté est généralement préparé avec un pourcentage solide variant entre 70 et 85% selon la densité relative des résidus (Hassani et Archibald 1998). Cette gamme de pourcentage solide correspond à l'affaissement au cône d'Abrams compris entre 6 pouces (15,24 cm) et 10 pouces (25,4 cm) permettant le transport adéquat en pipeline du RPC (Benzaazoua et al. 2003).

L'agent liant peut être soit du ciment Portland à usage courant ou type GU (*general use*) utilisé seul ou composé

avec un ajout minéral (scories ou *slag*, cendres volantes ou *fly ashes*, autres réactifs pouzzolaniques). Généralement, la résistance mécanique des remblais augmente avec l'augmentation de la quantité de liant (Belem et al. 2000). Cependant, les coûts du remblayage minier représentent une part importante des coûts d'exploitation d'une mine souterraine, soit entre 10% et 20% du coût total et le liant représente jusqu'à 80% du coût d'une opération de remblayage (Grice 1998). Ce coût pourrait être réduit avec la substitution partielle du ciment GU par des ajouts minéraux ou liants alternatifs moins chers (Peyronnard et Benzaazoua, 2012). Mais cette substitution ne sera effective que si l'on est capable de réaliser les bonnes formulations via un dosage optimal. De plus, il arrive qu'un ajout minéral coûte plus cher que le ciment; d'où la nécessité de pouvoir choisir un liant alternatif à performance équivalente à celle des liants conventionnels (Belem et Benzaazoua 2007, 2008, Belem 2009). Aussi, lors des phases d'études de pré faisabilité de systèmes de remblayage, une estimation préliminaire de la résistance mécanique potentielle du RPC est requise. Mais le choix d'un agent liant adapté et la prédiction de la résistance mécanique du RPC nécessitent l'usage d'un modèle mathématique. Ce dernier, pour être robuste devra s'appuyer sur les principaux paramètres physico-chimiques reliés à la formulation des recettes de mélanges de RPC. De tels paramètres physico-chimiques ont déjà été développés à cet effet (Belem et al. 2010).

L'objectif principal de cet article est de mettre au point un outil d'aide à la formulation des recettes de mélanges de remblai en pâte cimenté à l'aide d'une caractérisation expérimentale. À partir du développement mathématique de paramètres physico-chimiques des ciments et ajouts minéraux (sous-produits industriels), des optimums théoriques sont déterminés pour différents types d'agents liants. Différents mélanges de remblais en pâte cimentés sont ainsi préparés selon différentes formulations. Les éprouvettes préparées sont ensuite soumises à des essais de compression uniaxiale après quatre temps de cure. Pour l'ensemble des résultats obtenus on compare la résistance mécanique expérimentale à la prédiction de l'optimum théorique correspondant via l'indice d'hydratation relative, H_a .

2 DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'AIDE AU DOSAGE OPTIMAL DES AGENTS LIANTS

2.1 Modules hydrauliques

Dans l'industrie minière, l'agent liant (ou liant) est généralement un ciment composé qui est souvent obtenu par le mélange de deux types (binaire) de ciment (ciments Portland) et d'ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier granulé de haut fourneau (e.g., Belem et Benzaazoua 2008, Belem 2009). Afin de quantifier le contenu chimique d'un ciment, d'un ajout minéral ou d'un liant, différentes formules ont été proposées en se basant sur les quantités des principaux oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO et MgO). En pratique, le contenu chimique peut être décrit sous la forme d'indices ou de modules, résultats des études de

nombreux savants sur les mécanismes de formation et de réaction du clinker Portland : module hydraulique de Michaelis, modules silicique et aluminoferrique de Kühn, indice d'hydraulicité de Vicat, indice de saturation de Kühn et le facteur de saturation de Lea Parker. Dans cet article on s'intéresse au module hydraulique de Michaelis (HM) qui est souvent utilisé par les cimentiers pour le calcul des constituants du cru et même pour prédire l'activité hydraulique sur le développement de résistance mécanique. Ce module se définit par le ratio de la proportion de CaO et la somme des proportions de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , comme suit:

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{C}{S + A + F} \quad [1]$$

où : $C = CaO$ = pourcentage d'oxyde de calcium ; $S = SiO_2$ = pourcentage de silice ; $A = Al_2O_3$ = pourcentage d'alumine ; $F = Fe_2O_3$ = pourcentage d'oxyde ferrique.

Pour le clinker Portland, HM doit être compris entre 1,7 et 2,4. Dans cet intervalle, plus HM est grand et plus l'activité hydraulique du liant sera élevée. Si $HM > 2.4$ la résistance à court terme sera faible de même que lorsque $HM < 1.7$. Néanmoins, il ne semble pas exister une corrélation satisfaisante entre HM du liant et la résistance mécanique (Belem et al. 2010). Toutefois, selon Kamon et Nontananandh (1991) la propriété hydraulique (auto-durcissement) du ciment est bien décrite par le module hydraulique.

Pour les remblais miniers cimentés, le module hydraulique d'un agent liant (ou ciment composé) peut être écrit sous la forme suivante (Belem et al. 2010) :

$$Hm_b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i C_i}{\sum_{i=1}^n y_i S_i + \sum_{i=1}^n y_i A_i + \sum_{i=1}^n y_i F_i} \quad [2]$$

où y_i est la proportion fractionnaire du ciment/ajout minéral dans le mélange.

La Figure 1 montre l'évolution des courbes du module hydraulique en fonction de la proportion de substitution au ciment GU de base. Plus le module hydraulique est élevé, plus l'activité hydraulique du ciment est élevée et plus celui-ci présente une habilité de durcissement. Trois classes d'activité hydraulique ont été définies et tenant pas compte de la cristalochimie (Belem et al. 2010) :

- Classe I ($1,7 < Hm_b \leq 2,4$) : les liants de cette classe se caractérisent par des propriétés hydrauliques qui leur permettent de développer une résistance raisonnable à court terme. Les propriétés de ces liants sont similaires à ceux du silicate tricalcique (C_3S) et du ciment Portland GU.
- Classe II ($0,36 < Hm_b \leq 1,7$) : pour cette classe les liants sont considérés comme des matériaux qui s'hydratent lentement, mais qui développent une bonne résistance à long terme (âge ≥ 91 jours).
- Classe III ($0 \leq Hm_b \leq 0,36$) : les liants appartenant à cette classe sont non hydrauliques. Ils ont une faible activité hydraulique, et ils sont incapables de

développer des résistances ni à court, ni à long termes (exemple: fumée de silice).

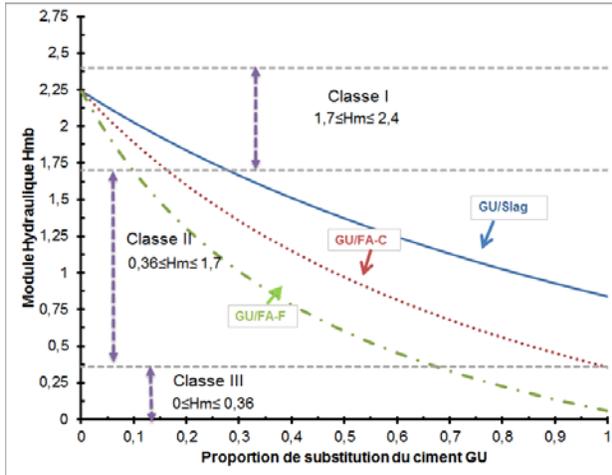


Figure 1. Exemples d'évolutions de Hm_b en fonction de la fraction de substitution du ciment GU.

2.2 Facteur de réactivité relative Rf

La réactivité chimique d'un agent liant dépend de son degré de cristallinité, de sa finesse et du rapport eau/liant du RPC. Pour ce qui est de la finesse du liant, plus elle est élevée et plus il développera des résistances à court terme élevées. La finesse d'un liant est quantifiée par la surface spécifique massique (SS_m) aussi appelée l'aire massique. La surface spécifique massique est définie comme étant le rapport entre l'aire superficielle (A_s) et la masse M du solide :

$$SS_m = \frac{A_s}{M} \quad [3]$$

Il existe une relation directe entre la finesse des particules et leurs diamètres. En supposant des particules sphériques ayant le même diamètre (d) et la même masse volumique des grains solides (ρ_s), l'expression de la surface spécifique peut se réécrire de la façon suivante :

$$SS_m = 6(\rho_s d)^{-1} \quad [4]$$

L'équation 4 montre que la surface spécifique (SS_m) est inversement proportionnelle au diamètre des particules. En s'appuyant sur cette relation, Belem et al. (2010) ont pu définir le facteur de réactivité relative (Rf) d'un ciment par l'équation suivante :

$$Rf = SS_m \rho_s d_{av} \quad [5]$$

où : SS_m = surface spécifique du ciment (cm^2/g) ; ρ_s = masse volumique des grains du ciment (g/cm^3) ; d_{av} = diamètre moyen des grains du ciment (cm). Dans le cas d'un agent liant (ciment composé) le facteur de réactivité peut être calculé comme suit :

$$Rf_b = SS_{m-b} \rho_{s-b} d_{av-b} \quad [6]$$

et :

$$SS_{m-b} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{(SS_{m-b})_i} \right]^{-1} = \left[\frac{y_1}{(SS_{m-b})_1} + \frac{y_2}{(SS_{m-b})_2} + \dots \right]^{-1}$$

$$\rho_{s-b} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{(\rho_{s-b})_i} \right]^{-1} = \left[\frac{y_1}{(\rho_{s-b})_1} + \frac{y_2}{(\rho_{s-b})_2} + \dots \right]^{-1}$$

$$d_{av-b} = \sum_{i=1}^n y_i (d_{av-b})_i = y_1 (d_{av-b})_1 + y_2 (d_{av-b})_2 + \dots$$

où : SS_{m-b} = surface spécifique du liant (cm^2/g) ; ρ_{s-b} = masse volumique des grains du liant (g/cm^3) ; d_{av-b} = diamètre moyen des grains du liant (cm) ; y_i = proportion fractionnaire du ciment dans le liant ; $i = 1$ correspond au ciment portland (= Type GU).

2.3 Indice d'hydratation relative H_a

2.3.1 Définition de l'indice

Étant donné que la finesse du liant joue un rôle important dans l'hydratation du liant à court terme (0-28 jours), la quantification de l'activité hydraulique d'un agent liant peut être estimée en pondérant le module hydraulique (Hm_b) par le facteur de réactivité relative (Rf). Ici, on suppose que l'activité hydraulique d'un agent liant est quantifiée par l'indice d'hydratation relative (H_a) qui est défini comme suit (Belem et al. 2010):

$$H_a = \left(\frac{Hm_b}{Hm_{GU}} \right) \left(\frac{Rf_{GU}}{Rf_b} \right)^{-\alpha} \quad [7]$$

où Hm_b = module hydraulique de l'agent liant ; Rf_b = facteur de réactivité relative de l'agent liant ; α = constante de calibrage (= 0.03 dans cette étude). Lorsque $H_a = 0$, le liant n'est pas capable de s'auto-hydrater (non hydraulique). En outre, lorsque $H_a = 1$ le liant a des propriétés d'auto-hydratation similaires à ceux du ciment Portland type GU.

L'indice d'hydratation relative qui peut être utilisé pour distinguer l'activité hydraulique des différents agents liants utilisés dans la préparation des remblais miniers cimentés, peut être aussi prédit à l'aide de la relation suivante :

$$H_a \approx 0.446(Hm_b)^{1.0011} \quad \text{avec } r = 1 \quad [8]$$

Ainsi, il suffit de calculer Hm_b à l'aide de l'équation 2 et de prédire H_a à l'aide de l'équation 8. De là, cet indice peut servir d'outil de prédiction et d'aide à la présélection d'agents liants optimaux pour la fabrication des remblais en pâte cimentés. La Figure 2 montre l'évolution théorique des courbes de réactivité (H_a) des agents liants utilisés dans la préparation des remblais miniers en pâte cimentés.

2.3.2 Concept d'agent liant de référence

La résistance en compression uniaxiale (UCS) du RPC est contrôlée par les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des résidus, la chimie de l'eau de mélange et le type d'agent liant et sa proportion (Belem et al. 2000, Benzaazoua et al. 2000, 2004).

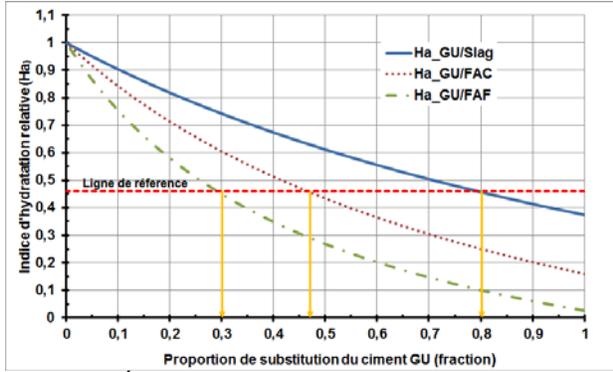


Figure 2. Évolution de l'indice d'hydratation relative en fonction de la fraction de substitution du ciment GU.

Les études réalisées par Benzaazoua et al. (2000, 2004a,b) montrent que pour un RPC fait de résidus non sulfureux et une eau de mélange non sulfatées, il est conseillé d'utiliser le ciment Portland GU comme agent liant. En outre, quand les résidus sont réactifs et/ou l'eau de mélange est sulfatée les ciments Portland résistant aux sulfates tels que le type II (MS) et le type V (HS) sont privilégiés (ACI 1998). En revanche, ces derniers sont parfois plus chers que le ciment Portland type GU. D'où l'utilisation des ajouts minéraux tels que la slag et les cendres volantes de classe F (Fly Ash class F ou FA-F), comme substituts au ciment Portland type GU comme agents liants pour les RPC fabriqués avec des résidus sulfureux et une eau sulfatée (Benzaazoua et al. 2002, Belem et Benzaazoua 2008).

D'autres études ont montré que le liant au laitier de hauts fourneaux (20GU/80Slag) est fortement recommandé pour l'utilisation avec des résidus ayant une faible ou moyenne teneur en sulfates (Benzaazoua et al. 2000, Belem et al. 2000 ; Belem et Benzaazoua 2008; Benzaazoua et al. 2002, 2004a,b, 2008, 2010).

Dans la pratique du remblayage en pâte cimenté, l'agent liant (20GU/80Slag) est considéré comme le liant le plus adéquat utilisé dans la plupart des mines canadiennes du fait des fortes résistances mécaniques développées. Par conséquent, le ciment composé 20GU/80Slag a été défini comme agent liant de référence afin de servir comme base de comparaison pour les autres types de liants à base d'ajouts minéraux. Les paramètres physico-chimiques de ce liant de référence (20GU/80Slag) sont définis comme suit :

$$Hm_{b-ref} = \frac{0.2(C)_{GU} + 0.8(C)_{Slag}}{0.2(S+A+F)_{GU} + 0.8(S+A+F)_{Slag}} \quad [8a]$$

$$H_{a-ref} = \left(\frac{Hm_{b-ref}}{Hm_{GU}} \right) \left(\frac{Rf_{GU}}{Rf_{b-ref}} \right)^{-\alpha} \quad [8b]$$

$$Rf_{b-ref} = (SS_{m-b} \cdot \rho_{s-b} \cdot d_{av-b})_{ref} \quad [8c]$$

2.3.4 Optimum de réactivité des agents liants

Plutôt que d'utiliser une ligne de référence pour déterminer les fractions de substitution d'un liant «équivalent» au liant de référence (cf. Fig. 2), il est

possible d'utiliser une représentation probabiliste basée sur les fonctions de densité de probabilité (*pdf*). Puisque les notions de moyenne (ou espérance) et d'écart-type ne s'appliquent pas à la distribution des paramètres physico-chimiques des liants, la *fdp* pourrait alors être décrite par la loi de Cauchy (ou loi de Lorentz). La courbe obtenue par la *fdp* de la loi de Cauchy est appelée "cloche de Cauchy" qui est aussi une cubique d'Agnesi donnée par la relation suivante :

$$f(x) = \frac{a^3}{[a^2 + x^2]} \quad [9]$$

En considérant que $x_0 = Hm_{b-ref}$ est un paramètre de position et que le paramètre d'échelle $a = H_{a-ref}$, la *pdf* de la loi de Cauchy ayant la même échelle que la cubique d'Agnesi s'écrit alors :

$$f(Hm_b) = \frac{H_{a-ref}^3}{[H_{a-ref}^2 + (Hm_b - Hm_{b-ref})^2]} \quad [10]$$

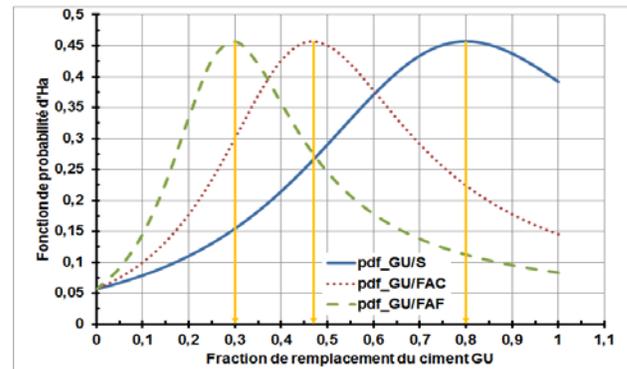


Figure 3. Fonction de densité de probabilité de Ha en fonction de la fraction de remplacement du ciment GU.

La Figure 3 montre les fonctions de densité de probabilité (cloches de Cauchy) du module hydraulique des agents liants présentés en fonction de la fraction de substitution du ciment GU. Ces courbes permettent de sélectionner directement les fractions optimales des agents liants. La valeur optimale de l'indice d'hydratation relative H_a est de 0.46. Par conséquent, tout liant ayant un H_a de 0.46 peut être considéré comme un liant efficace qui devrait fournir la meilleure résistance parmi sa catégorie. Ainsi, à partir de la Figure 3 on peut déterminer que les liants 70GU/30FA-F et 53GU/47FA-C possèdent le même $H_a = 0.46$ que le liant de référence (20GU/80Slag) et devraient donc développer la résistance maximale parmi leur catégorie.

3 APPLICATION EXPERIMENTALE

3.1 Ingrédients du remblai en pâte cimenté

3.1.1 Résidus miniers

Les résidus utilisés dans cette étude proviennent de la mine A. Les propriétés physiques et minéralogiques sont présentées dans le Tableau 1. La distribution

granulométrique de ces résidus a été déterminée au moyen du granulomètre au laser Mastersizer 2000 de Malvern (Figure 4). Quant à la composition minéralogique, elle a été obtenue à l'aide d'un diffractomètre aux rayons X (Burker A.X.S modèle D8 Advance). Les principaux minéraux retrouvés dans ces résidus sont le Quartz 34,77% et la muscovite 22,66%. Les résidus de la mine A avaient une densité relative $D_R = 2.9$.

Tableau 1. Propriétés physiques et minéralogiques du résidu Casa Berardi

Paramètre	Valeur	Minéral	Valeur (%)
D ₁₀	3.6 µm	Quartz	34.77
D ₃₀	9 µm	Chlorite	12.33
D ₅₀	19.3 µm	Ankérinite	18.33
D ₆₀	26.2 µm	Pyrite	2.68
D ₉₀	120.7 µm	Albite	9.24
C _u	7.28	Muscovite	22.66
C _c	0.86		

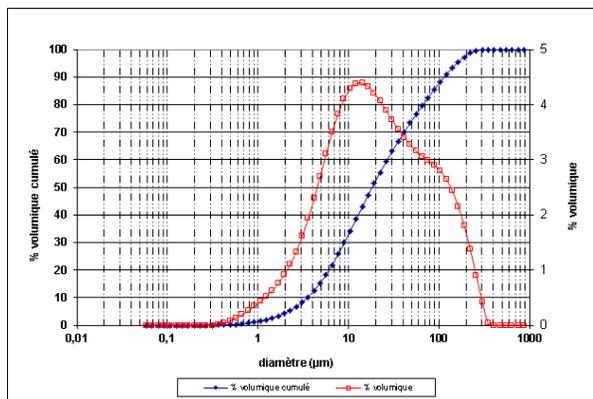


Figure 4. Courbes de distribution granulométrique des résidus de la mine A.

3.1.2 Catégories d'agents liants

Dans cette étude, plusieurs recettes de remblais en pâte cimentée seront préparées et testées. Ces recettes sont fabriquées avec trois types d'agent liant, dont le ciment Portland type GU est le ciment de base qui est substitué par différentes proportions d'ajouts minéraux. Ces agents liants, fournis par Lafarge Canada, sont:

- liants au laitier de hauts fourneaux (GU/Slag) ;
- liants aux cendres volantes classe F (GU/FA-F) ;
- liants aux cendres volantes classe C (GU/FA-C).

Les propriétés physico-chimiques du ciment et des ajouts minéraux sont résumés dans les Tableaux 2 et 3.

Tableau 2. Propriétés chimiques du ciment et des ajouts minéraux

Liant	Composition chimique (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
GU	20.5	5.4	2.6	63.9	2.1
Slag	36	10	0.5	39	12
FA-C	35	18	6	21	5
FA-F	52	23	11	5	2

Tableau 3. Propriétés physiques du ciment et des ajouts minéraux

Liant	Propriétés physiques		
	SS _m (cm ² /g)	ρ _s (g/cm ³)	d _{av} (cm)
GU	3690	3.15	0.0015
Slag	5000	2.94	0.0011
FA-C	4200	2.38	0.0025
FA-F	4200	2.58	0.001

3.1.3 Eau de mélange

Les différentes recettes de mélanges de remblai en pâte seront préparées avec l'eau du robinet de la Municipalité de Rouyn-Noranda.

3.2 Préparation des mélanges de remblai en pâte

3.2.1 Programme expérimental

Le Tableau 4 présente l'ensemble des agents liants qui seront testés dans les recettes de mélanges. Pour chaque type d'agent liant, deux proportions seront testées : 4.5% et 7% de la masse de résidus secs. Aussi, un seul slump (affaissement au cône d'Abrams) sera visé, à savoir 7 pouces (178 mm). Les éprouvettes seront testées à quatre temps de cure : 14, 28, 56 et 90 jours.

3.2.2 Préparation des mélanges

Une fois les quantités déterminées, les résidus sont mélangés avec le liant, puis l'eau est rajoutée progressivement jusqu'à obtenir le slump visé de 7" (%solide 70 - 72%). Ce dernier a été mesuré à l'aide d'un test d'affaissement au cône d'Abrams. Le remblai en pâte ainsi mélangé est coulé dans des moules en plastique d'un diamètre de 5.08 cm (2") et d'une hauteur de 10.16 cm (4"). Au total, 312 éprouvettes ont été fabriquées. Les éprouvettes sont ensuite entreposées dans une chambre humide (T = 23°C, HR > 90%) pour les quatre temps de cure (14, 28, 56 et 90 jours).

Tableau 4. Définition des agents liants pour chaque catégorie de liant (*référence; **liant optimal)

GU/Slag	GU/FA-F	GU/FA-C
10GU/90Slag	40GU/60FA-F	30GU/70FA-C
20GU/80Slag*	50GU/50FA-F	50GU/50FA-C
30GU/70Slag	60GU/40FA-F	57GU/43FA-C**
40GU/60Slag	70GU/30FA-F**	60GU/40FA-C
100GU (témoin)	100GU (témoin)	70GU/30FA-C
		100GU (témoin)

3.2.3 Essais de compression uniaxiale

Le comportement mécanique a été évalué à l'aide de la résistance en compression uniaxiale (UCS) déterminée pour chaque temps de cure. La compression uniaxiale a été effectuée à l'aide d'une presse mécanique MTS 10/GL d'une capacité de 50 kN et à un taux de déplacement de 1 mm/min. La valeur de l'UCS correspond à la moyenne des triplicatas de la contrainte maximale observée durant l'essai de compression.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Compression uniaxiale des recettes avec GU/Slag

Les Figures 5 et 6 présentent l'évolution de l'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU par de la Slag et pour les quatre temps de cure. Les taux de substitution sont : 0%, 60%,70%, 80% et 90% de Slag avec deux pourcentages de liant de 4.5% (Figure 5) et 7% (Figure 6).

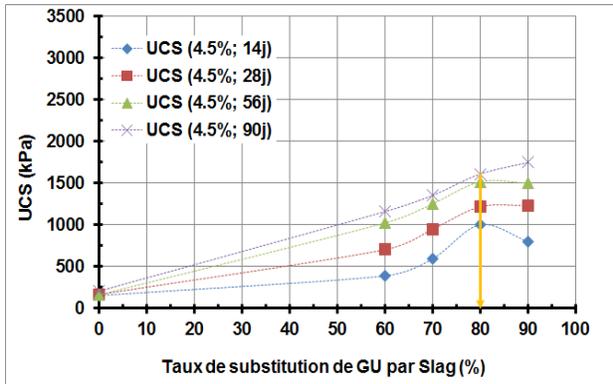


Figure 5. Variation d'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU (catégorie de liants GU/Slag) pour les quatre temps de cure et pour 4.5% de liant

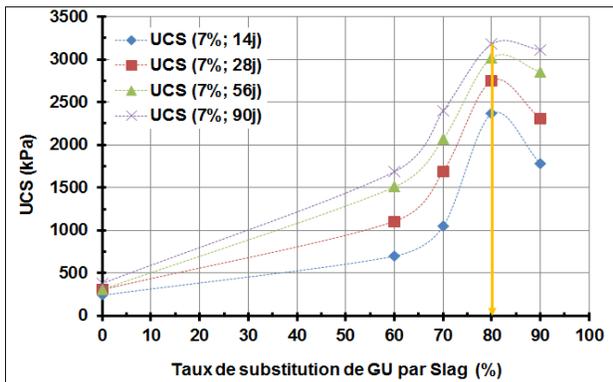


Figure 6. Variation d'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU (catégorie de liants GU/Slag) pour les quatre temps de cure et pour 7% de liant

Les courbes des Figures 5 et 6 montrent tout d'abord l'existence d'un net optimum de résistance qui correspond aux recettes préparées avec le liant dit de référence 20GU/80Slag et pour les quatre temps de cure testés. Toutefois, avec 4.5% de liant et après 90 jours de cure c'est la recette avec le liant 10GU/90Slag qui a développé la résistance la plus élevée. L'optimum de résistance est aussi plus marqué lorsque le pourcentage de liant passe de 4.5% à 7%.

D'une manière générale, les résistances obtenues avec l'ensemble des recettes de mélanges avec 7% de liant sont systématiquement plus élevées que celles obtenues avec les recettes de mélanges avec 4,5% de liant. Il s'agit de l'effet de la proportion du liant qui a été

observé par plusieurs auteurs : plus le pourcentage liant augmente et plus la résistance augmente.

Ces résultats montrent en outre que les plus faibles résistances mécaniques ont été obtenues avec le liant témoin (100GU). Par rapport au liant témoin et à 28 jours de cure, on observe un gain de résistance avec le liant 20GU/80Slag (référence) de 87% avec 4.5% de liant et un gain de 89% avec 7% de liant. À 90 jours de cure ces gains de résistance sont de 87% avec 4.5% de liant et de 88% avec 7% de liant.

4.2 Compression uniaxiale des recettes avec GU/FA-F

Les Figures 7 et 8 présentent la variation de l'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU par les cendres de classe F (FA-F) et pour les quatre temps de cure. Les taux de substitution sont : 0%, 25%,30%, 40%, 50% et 70% de FA-F avec deux pourcentages de liant de 4.5% (Figure 7) et 7% (Figure 8).

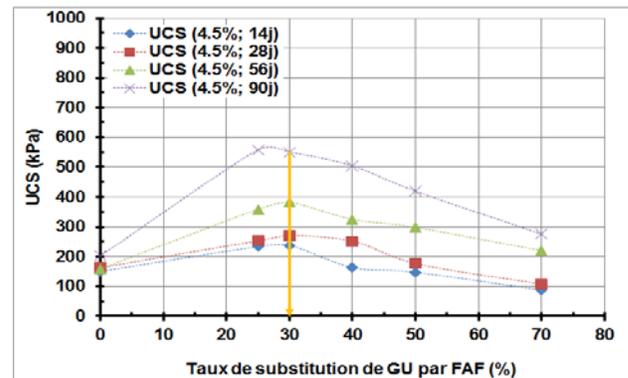


Figure 7. Variation d'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU (catégorie de liants GU/FA-F) pour les quatre temps de cure et pour 4.5% de liant

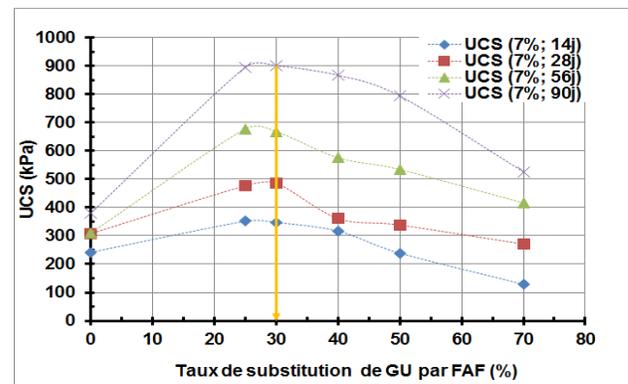


Figure 8. Variation d'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU (catégorie de liants GU/FA-F) pour les quatre temps de cure et pour 7% de liant

Les Figures 7 et 8 montrent des courbes en cloche qui traduisent l'existence d'un optimum de résistance qui correspond aux recettes préparées avec le liant dit optimal (70GU/30FA-F) et pour les quatre temps de cure. Tel qu'observé avec les liants GU/Slag, plus le pourcentage liant augmente et plus la résistance

augmente. Aussi, l'optimum de résistance théorique semble correspondre à celui expérimental et avec les deux pourcentages de liant testés (4.5% et 7%).

Les résultats montrent qu'à court terme (14 et 28 jours de cure) la plus faible résistance mécanique a été développée avec le liant 30GU/70FA-F et ce, pour les deux pourcentages de liant testés. Par contre à moyen et long termes (56 et 90 jours de cure) la plus faible résistance a été développée avec le liant témoin (100GU). Par rapport au liant témoin et à 28 jours de cure, on observe un gain de résistance avec le liant 70GU/30FA-F (optimal) de 40% avec 4.5% de liant et un gain de 37% avec 7% de liant. À 90 jours de cure ces gains de résistance sont de 63% avec 4.5% de liant et de 58% avec 7% de liant. On peut noter que les plus forts gains de résistance sont obtenus avec le plus faible pourcentage de liant de 4.5%.

4.3 Compression uniaxiale des recettes GU/FA-C

Les Figures 9 et 10 présentent la variation de l'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU par la fly ash de classe C (FA-C) et pour les quatre temps de cure. Les taux de substitution sont : 0%, 30%,40%, 47%, 50% et 60% de FA-C avec deux pourcentages de liant de 4.5% (Figure 9) et 7% (Figure 10).

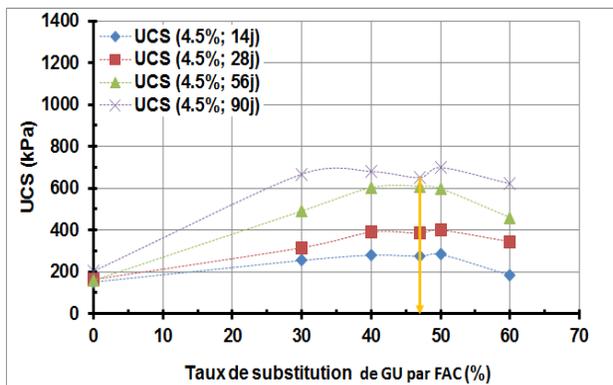


Figure 9. Variation d'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU (catégorie de liants GU/FA-C) pour les quatre temps de cure et pour 4.5% de liant

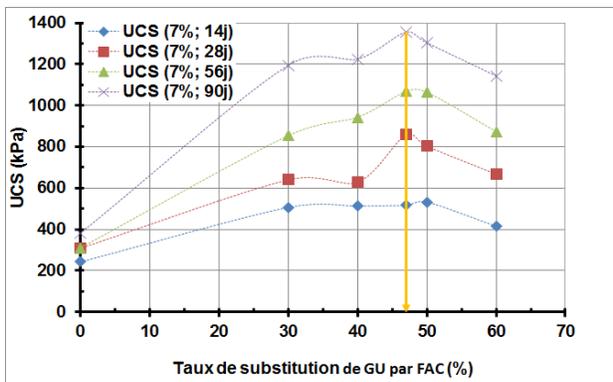


Figure 10. Variation d'UCS en fonction du pourcentage de substitution du ciment GU (catégorie de liants GU/FA-C) pour les quatre temps de cure et pour 7% de liant

Les Figures 9 et 10 montrent à nouveau des courbes en cloche qui traduisent l'existence d'un optimum de résistance correspondant aux recettes préparées avec le liant dit optimal (53GU/47FA-C) et pour les quatre temps de cure. On observe à nouveau que la résistance augmente avec l'augmentation du pourcentage de liant. Aussi, l'optimum de résistance théorique semble correspondre à celui expérimental, surtout avec le pourcentage de liant de 7%.

Ces résultats montrent que les plus faibles résistances mécaniques ont été obtenues avec le liant témoin (100GU). Par rapport au liant témoin et à 28 jours de cure, on observe un gain de résistance avec le liant 53GU/47FA-C (optimal) de 58% avec 4.5% de liant et un gain de 64% avec 7% de liant. À 90 jours de cure ces gains de résistance sont de 69% avec 4.5% de liant et de 72% avec 7% de liant. On peut noter que les plus forts gains de résistance sont obtenus cette fois avec le plus fort pourcentage de liant de 7%.

4.4 Discussion

Les résultats d'UCS obtenus de l'ensemble des recettes de mélanges de remblai en pâte cimenté révèlent que pour chaque type d'agent liant (ciment composé) il existait une recette optimale qui avait pu être anticipée avec l'aide de l'indice d'hydratation relative H_a . En d'autres termes, ces recettes ont pu développer la meilleure résistance aux quatre temps de cure et avec 4.5% et 7% de liant.

La Figure 11 présente la variation de l'UCS au cours du temps de cure pour les recettes optimales des trois catégories d'agents liants (20GU/80Slag, 70GU/30FA-F et 53GU/47FA-C) et pour le liant témoin (100GU). On y voit que les résistances obtenues avec le liant 20GU/80Slag étaient de loin les plus élevées, confirmant ainsi son choix comme liant de référence. D'autre part, même si tous les liants optimaux ont la même valeur de $H_a = 0.46$, la Figure 11 suggère que les mécanismes de réaction d'hydratation diffèrent entre liants. Par conséquent, il serait difficile de définir un liant équivalent du fait des différences de leur degré de vitrification. En moyenne, l'UCS du liant de référence est 9 fois celle du liant 100GU, 5 fois celle du liant 70GU/30FA-F et 3 fois celle du liant 53GU/47FA-C.

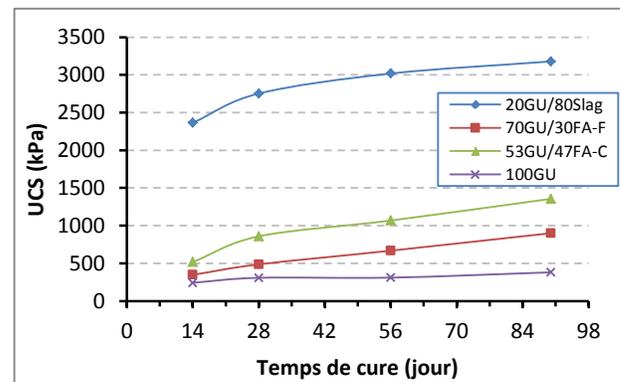


Figure 11. Variation de l'UCS en fonction du temps de cure pour la recette témoin et les recettes optimales ($H_a = 0.46$) préparées avec 7% de liant

5 CONCLUSION

Dans cet article, des paramètres physico-chimiques définis pour quantifier le contenu chimique et le degré de réactivité chimique relative des agents liants (ciments composés) utilisés généralement dans la fabrication des remblais miniers en pâte cimentés ont été présentés. Il s'agit du module hydraulique (Hm_b) et de l'indice d'hydratation relative (H_a) qui est défini en fonction de Hm_b et du facteur de réactivité relative (Rf_b). L'objectif de cet article était de valider expérimentalement ces paramètres physico-chimiques sur la base des essais de compression uniaxiale (UCS). Les paramètres Hm_b et H_a ont donc été utilisés pour la sélection des agents liants optimaux parmi trois catégories de liants qui sont à base de slag (GU/Slag), de fly ash classe F (GU/FA-F) et de fly ash classe C (GU-FA-C). Les trois optimaux sélectionnés sont : 20GU/80Slag, 30GU/70FA-F et 53GU/47FA-C.

Les résultats d'UCS confirment clairement que les résistances mécaniques les plus élevées pour chaque catégorie de liant correspondaient exactement aux recettes préparées avec les liants optimaux sélectionnés à l'aide de H_a . Aussi, le fait que les résistances obtenues avec le liant 20GU/80Slag étaient les plus élevées de celles des autres types de liant valide le choix de ce liant comme liant de référence.

L'étude a démontré que l'indice d'hydratation relative (H_a) pourrait représenter un outil adéquat et simple pour la sélection des agents liants optimaux pour une utilisation dans les recettes de mélanges des remblais miniers en pâte cimentés.

6 RÉFÉRENCES

- ACI Committee 211 (1998) Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, ACI 211.2-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1998, 14 p.
- Belem, T., Benzaazoua, M., Bussière, B. (2000). Mechanical behaviour of cemented paste backfill. In: Proceedings of 53th Canadian Geotechnical Conference, "Geotechnical Engineering at the dawn of the third millennium", 15-18 October 2000, Montreal, Vol. 1: 373-380.
- Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M., (2001). The effect of microstructural evolution on the physical properties of paste backfill, in Proceedings of Tailings and Mine Waste'01, January 16-19, Fort Collins, Colorado, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 365-374.
- Belem, T., Benzaazoua, M. (2007). Underground mine paste backfill technology: applications and design methods. Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 26(2): 147-174.
- Belem, T., Benzaazoua, M. (2008). Predictive models for prefeasibility cemented paste backfill mix design. Proc. International Symposium on Post-Mining 2008. Nancy, France. February 6-8, CD ROM.
- Belem, T. (2009). Développement d'une méthode intégrée d'analyse de stabilité des chantiers miniers remblayés. Rapport IRSST, Août 2009.
- Belem, T., Peyronnard, O., Benzaazoua, M. (2010). A model of formulation of blended binders for use in cemented mine backfills. Proceedings of 1st International Seminar on Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste – Mine Waste 2010, A.B. Fourie and R.J. Jewell (eds), Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia (ISBN 978-0-9806154-2-5), 29 sept – 1st oct. 2010, pp. 433-447.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S. Newman, P., Verburg, R. (1999). Cementitious backfill with high sulfur content: physical, chemical and mineralogical characterization. Cement and Concrete Research, 29, pp. 719-725.
- Benzaazoua, M., Belem, T., Bussière, B. Ouellet, S. (2002). Évolution des propriétés des remblais en pâte : principaux paramètres d'influence, Compte rendu du 17e Colloque en contrôle de terrain, Association minière du Québec, Val d'Or, Mars 2002.
- Benzaazoua, M., Fall, M. and Belem, T. (2004a). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. Minerals Engineering. Vol. 17(2): 141-152.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I. and Bussière, B. (2004b). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. Minerals Engineering. Vol. 17(2): 233-243.
- Benzaazoua, M., Peyronnard, O., Belem, T., Fried, E., Stephant D. and Dublet, G. (2010). Key issues related to behavior of binders in cemented paste backfilling. Paste 2010, R.J. Jewell and A.B. Fourie (eds), Toronto, Canada, 3-6 May. Vol. 13: 345-364.
- Hassani, F., archibald, J.H. (1998). Mine Backfill. CD-ROM.
- PPeyronnard, O., Benzaazoua, M. (2012). Alternative by-product based binders for cemented mine backfill: Recipes optimization using Taguchi method, Minerals Engineering, 29: 28-38.