



Influence de la procédure de malaxage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de remblais en pâte cimentés

Dikonda K.R, Mbonimpa M. et Belem T.

Institut de recherche en mines et environnement (IRME)

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada

RÉSUMÉ

L'objectif de ce papier est d'évaluer dans quelle mesure la consistance (affaissement au cône), les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) et mécaniques (*unconfined compressive strength* UCS) déterminées au laboratoire durant la phase d'optimisation des recettes de remblais en pâte cimentés (RPC) peuvent dépendre de la procédure de malaxage pour un type de malaxeur donné. Pour cela, les propriétés rhéologiques et mécaniques de RPC avec 75 % solide ont été préparés en variant successivement la durée, la vitesse et la masse de charge de malaxage. Les résultats ont montré que l'affaissement au cône et la résistance en compression uniaxiale augmentent avec la durée et la vitesse de malaxage. Le seuil de cisaillement et la viscosité à l'infini diminuent lorsque la durée et la vitesse de malaxage augmentent. D'une manière générale, l'augmentation de la masse malaxée a tendance à améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC.

ABSTRACT

The objective of this paper is to evaluate to what extent the consistency (slump), rheological properties (yield stress and viscosity) and mechanical properties (*unconfined compressive strength* UCS) determined in the laboratory during the optimization phase of the recipes of cemented paste backfill (CPB) may be dependent on the mixing procedure for a particular type of mixer. For this purpose, rheological and mechanical properties of CBB at 75% solid content were prepared by successively varying the mixing duration and speed and the mass of mixing charge. The results showed that the slump and UCS increased with the mixing duration and speed. The yield stress and the viscosity at high shear rate decreased as the mixing duration and speed increased. In general, the increase in the mixed mass charge tends to improve the rheological and mechanical properties of the CPB.

1 INTRODUCTION

L'exploitation minière génère d'énormes quantités de rejets, incluant les roches stériles et les rejets de concentrateurs ou résidus miniers. une production annuelle de résidus comprise entre 5 et 7 milliards de tonnes à travers le monde a été rapportée récemment (Mudd and Boger 2013). Ces rejets peuvent potentiellement affecter l'environnement, particulièrement lorsqu'ils contiennent certains minéraux sulfureux métalliques (pyrite, pyrrhotite, etc.) pouvant s'oxyder et générer du drainage minier acide (DMA)(Gray 1997; Bell and Donnelly 2006; Hudson-Edwards et al. 2011). Dans le cas de mines souterraines, une alternative de gestion durable de ces résidus miniers consiste à en retourner une bonne partie sous terre à travers la technologie de remblai en pâte cimenté (RPC). Le RPC assure la stabilité géomécanique de l'ossature de la mine en intervenant comme support de terrain. Cela offre non seulement des conditions de travail sécuritaires, mais aussi la possibilité d'augmenter le taux de récupération minière par l'abatage des piliers primaires (Belem et al. 2003; Li et al. 2005).

Typiquement, le RPC peut être décrit comme un matériau composite complexe obtenu après malaxage d'une masse de matériaux constitués principalement de résidus miniers filtrés (68 à 85% solides), d'une quantité relativement petite du liant (2 à 8% par rapport à la masse de résidus secs) et de l'eau de gâchage (15 à 30%)

(Amaratunga and Yaschyshyn 1997; Landriault et al. 1997; Belem et al. 2016). Le mélange obtenu est ensuite transporté dans des pipelines et trous de forages depuis l'usine de fabrication jusqu'au chantier à remblayer. Le RPC doit alors présenter des propriétés rhéologiques qui favorisent son transport en réduisant le frottement dans l'interface matériau-conduite. Les propriétés rhéologiques du RPC sont souvent évaluées à travers des paramètres comme le seuil de cisaillement et la viscosité dynamique (Haiqiang et al. 2016; Ouattara et al. 2017a). Ces propriétés mesurent l'état de fluidité du mélange, c'est-à-dire sa capacité à s'écouler sous l'effet des contraintes appliquées (pression de pompage ou forces de gravité) sans provoquer le blocage dans la conduite durant le transport en pipeline. Le blocage dans la tuyauterie durant le transport du RPC peut engendrer des conséquences néfastes sur les opérations minières : perte de productivité, augmentation du coût de remblayage, etc. Dans la pratique, la consistance du RPC déterminée à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (ou *slump*) est néanmoins utilisée pour évaluer la consistance du RPC (Belem et al. 2003; Creber et al. 2017). L'ajout du liant dans le mélange permet au RPC de développer des propriétés mécaniques adéquates (Belem et al. 2003; Yilmaz et al. 2015). La résistance en compression uniaxiale (ou *unconfined compressive strength*, UCS) constitue le paramètre-clé pour le design de la stabilité physique des chantiers.

Les propriétés rhéologiques et mécaniques déterminées dans la phase d'optimisation des recettes au laboratoire avec un type donné de malaxeur peuvent dépendre de la procédure de malaxage utilisée pour la fabrication des mélanges de RPC (durée et vitesse de malaxage, et masse de charge). La procédure de malaxage des mélanges de RPC rapportée dans la littérature dépend plus de l'appréciation d'un expérimentateur à l'autre. Pour le malaxeur Hobart SP300AT par exemple, la durée de malaxage peut varier de 5 à 15 minutes et la vitesse de malaxage peut passer de basse à haute vitesse selon les cas (Belem et al. 2002; Ouattara et al. 2017b). De plus, la masse de charge du malaxeur n'est pas toujours identique. On ignore cependant à quel point cette variabilité des paramètres de malaxage affecte les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC qui en résultent. Dans ces conditions, la comparaison des résultats inter-laboratoires peut s'avérer difficile si la même procédure de malaxage n'a pas été appliquée. Il serait alors pertinent d'évaluer dans quelle mesure la procédure de malaxage du RPC au laboratoire affecte les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC. Or à ce jour, l'étude de la procédure de malaxage dans le contexte de préparation du RPC, ou du moins de l'un de ses composants (durée de malaxage, vitesse de malaxage, et masse de charge du malaxeur), n'a pas été assez documentée. L'objectif de cet article est d'évaluer l'impact des paramètres de malaxage susmentionnés sur la performance des propriétés rhéologiques et mécaniques des mélanges de RPC.

2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Matériaux utilisés

Les résidus miniers en provenance de la mine A située en Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada) ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Ces résidus, déjà filtrés et échantillonnés de manière représentative, ont été livrés au laboratoire de l'URSTM dans des barils de 45 galons. Une fois réceptionnés, ces résidus ont été homogénéisés à la pelle, stockés dans des chaudières de 15 kg jusqu'à leur utilisation pour éviter leur oxydation. Tous les mélanges ont été préparés à un pourcentage solide fixé à 75% en masse. Ce pourcentage solide a été choisi, car il permettait d'élaborer les recettes de RPC ayant un affaissement au cône standard de 7 pouces (178 mm), compris dans l'intervalle cible allant de 6 à 10 pouces (152–254 mm) que l'on considère comme condition nécessaire de transportabilité (Landriault et al. 1997; Belem and Benzaazoua 2008). Un mélange de 20% ciment Portland de type I, ou General use GU (CP I) et 80% de scorie de haut-fourneau (Slag) a été utilisé comme liant en faible proportion (taux de liant 4,5%). L'eau du robinet a été utilisée comme eau de mélange.

2.2 Caractérisations physiques et géotechniques des ingrédients du RPC

La caractérisation physique et géotechnique réalisée sur les constituants du RPC comprennent l'analyse granulométrique, la détermination de la densité relative des

grains solides et celle de la surface spécifique. L'analyse granulométrique des résidus a été réalisée au granulomètre au laser de marque Mastersize 2000 Malvern (Malvern Instruments, 2007) et la courbe granulométrique obtenue est présentée sur la figure 1 ci-dessous.

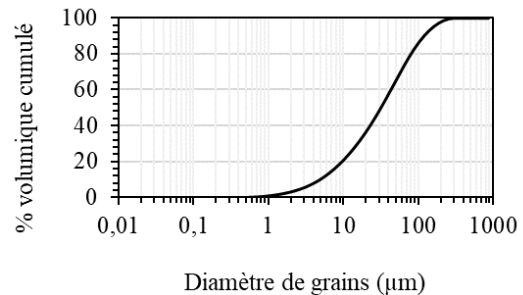


Figure 1. Distribution granulométrique (pourcentage volumique cumulé) des résidus étudiés

Le tableau 1 montre les paramètres caractéristiques de la courbe granulométrique incluant le coefficient d'uniformité C_U , le coefficient de courbure C_c , le coefficient de dispersion C_D , les diamètres D_x correspondant à x passant sur la courbe granulométrique, et les fractions de fine $P_{80 \mu m}$ et $P_{20 \mu m}$ (respectivement passants au tamis de 80 μm et 20 μm). Le pycnomètre à hélium de marque AccuPyc 1330 de Micromeritics a été utilisé pour déterminer la densité des grains solides des résidus. La procédure suivie pour déterminer cette densité est régie par la norme ASTM D5550. Un analyseur de surface GEMINI de Micromeritics a été ensuite utilisé pour déterminer la surface spécifique des grains. Les valeurs de la densité relative, de la surface spécifique, ainsi que celle du pourcentage solide initial obtenues pour le résidu de la Mine A sont également inscrites dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques physiques de résidus étudiés

Paramètres physiques	Valeurs
$C_U = D_{60}/D_{10}$	8,9
$C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$	1,1
$C_D = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$	3,6
D_{10} (μm)	4,9
D_{30} (μm)	15,5
D_{40} (μm)	22,8
D_{50} (μm)	31,9
D_{60} (μm)	43,4
D_{80} (μm)	80,7
D_{90}	119,8
$P_{20 \mu m}$	36,4
$P_{80 \mu m}$	79,7
D_R	3,14
S_s (m^2/g)	2,6
C_{w-l} (%)	82,4

La granulométrie de ces résidus est semi-étalée et la courbe est bien graduée (C_U de 8,9, compris entre 5 et 20 et C_c de 1,1, compris entre 1 et 3). La classification ASTM

Désignation D2487-11 de 2011 identifie ce résidu comme étant un silt plastique. Les résidus ont une densité des grains solides relativement importante (D_R de 3,14), due éventuellement à la présence des minéraux lourds (la pyrite par exemple) en grande quantité. La valeur de la surface spécifique mesurée est $2,6 \text{ m}^2/\text{g}$.

2.3 Compositions chimique et minéralogique des constituants du RPB

Les analyses chimiques effectuées dans le cadre de ce travail comprennent la spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES) et la spectrométrie de fluorescence X (XRF). Un échantillon représentatif et homogène de résidu a été dissout dans une solution d'acide concentré (HNO_3 , HCl , ou HF) et analysé par un spectromètre d'émission atomique ICP-AES de type Perkin-Elmer optima 3000 DV pour déterminer la composition chimique quantitative et qualitative élémentaire du résidu. Pour les analyses XRF, c'est l'appareil Niton XL3t 900SHE qui a été utilisé pour la détermination de la teneur en oxyde du liant. Le tableau 2 présente la composition chimique du résidu de la Mine A.

Tableau 2. Résultats des analyses chimiques par ICP-AES sur le résidu

Élément	Al	Ba	Ca	Cr	Fe	K
Proportion (%)	12,11	0,07	3,28	0,04	39,24	2,47
Élément	Li	Mg	Mn	S	Ti	Zn
Proportion (%)	0,03	0,72	0,23	41,13	0,43	0,25

Le tableau 2 montre que la proportion des éléments chimiques S (41,13 %), Fe (39,24 %), Al (12,11 %), Ca (3,28 %) et K (2,47%) est importante dans le résidu. D'autres éléments chimiques tels que Mg (0,72 %), Ti (0,43 %), Zn (0,25 %), Mn (0,23 %), Ba (0,07 %) et Li (0,03 %) sont également présents dans le résidu. Le tableau 3 présente les principaux oxydes constitutifs du liant.

Tableau 3. Résultats des analyses chimiques par XRF sur le liant

Composition	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO
Slag-GU_80/20 (%)	6,52	55,57	0,93	1,33	4,36
Composition	MnO	P_4O_6	S	SiO_2	TiO_2
Slag-GU_80/20 (%)	0,38	0,39	3,45	26,07	0,37

Les résultats du tableau 3 montrent que le liant contient du CaO (55,57%) et du SiO_2 (26,07%) en grande partie. La valeur de l'indice d'hydraulicité ($[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2]/[\text{MgO} + \text{CaO}]$) est de 0,54. La valeur de la surface spécifique et celle de la densité des grains solides de résidus sont respectivement de $4,74 \text{ m}^2/\text{g}$ et 2,9. Un diffractomètre de type Bruker D8 Advance AXS a été utilisé pour la caractérisation quantitative et qualitative de la minéralogie des résidus de la Mine A par diffraction de rayons X (DRX). Les résultats sont présentés à la figure 2. On peut observer

sur cette figure que le quartz (59%), la pyrite (18%) et l'albite (12%) constituent les phases minérales majeures dans le résidu. Par contre, la muscovite (4%), la chlorite (4%) et le gypse (3%) se présentent en phase mineure.

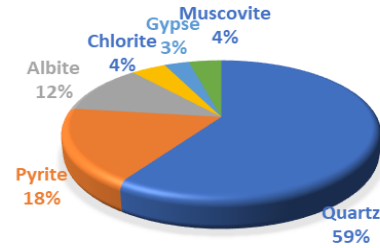


Figure 2. Résultats des analyses minéralogiques du résidu minier.

2.4 Procédure de malaxage et formulation des recettes

Une série de recettes de RPC a été préparée dans l'objectif d'étudier l'influence de trois paramètres de malaxage cités précédemment, à savoir la durée de malaxage, la vitesse de malaxage et la masse de charge du malaxeur, sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC. Le tableau 4 ci-dessous décrit la variation des paramètres de malaxage et leur temps de cure respectif pour les 3 groupes de mélanges préparés. Tous les mélanges ont été préparés dans le malaxeur Hobart SP300AT.

Tableau 4. Mélanges de RPC préparés en vue d'étudier l'influence de la procédure de malaxage sur les propriétés du RPC

N°	Masse de charge (kg)	Vitesse de malaxage (rpm)	Durée de malaxage (min)	Temps de cure (jours)
Durée de malaxage				
M01	4,7	166	5	7,28,90
M02	4,7	166	7	7,28,90
M03	4,7	166	10	7,28,90
M04	4,7	166	15	7,28,90
M05	4,7	166	30	7,28,90
Vitesse de malaxage				
M06	4,7	91	5	7,28,90
M07	4,7	166	5	7,28,90
M08	4,7	282	5	7,28,90
Masse de charge du malaxeur				
M09	4,7	166	5	7,28,90
M10	6,3	166	5	7,28,90
M11	9,5	166	5	7,28,90
M12	12,6	166	5	7,28,90

Le premier groupe de mélanges est la durée de malaxage. Il est obtenu en variant la durée de malaxage de 5 à 30 minutes, la vitesse de malaxage (166 rpm) et la masse de

charge (4,7 kg) étant maintenues constantes. La masse de charge (quantité totale en kg de matériaux introduits dans le malaxeur) est déterminée par le nombre de moules de RPC à remplir (trois temps de cure différents et moules en triplicata). Le deuxième groupe est la vitesse de malaxage. Le malaxage est fait à différentes vitesses de rotation de la pâle de 91, 166 à 282 rpm (correspondant respectivement aux vitesses basse, moyenne et élevée du malaxeur Hobart) en maintenant constantes la durée de malaxage (5 minutes) et la masse de charge (4,7 kg). La variation de la masse de charge du malaxeur constitue le troisième groupe de mélanges. Pour les mélanges de ce groupe, la durée de malaxage est maintenue à 5 minutes et la vitesse de malaxage à 166 rpm. Les masses de charge étudiées sont de 4,7, 6,3, 9,5 et 12,6 kg.

2.5 Caractérisations rhéologiques et mécaniques du RPC

La caractérisation rhéologique des recettes du RPC s'est déroulée en mesurant la valeur de l'affaissement au cône et les paramètres rhéologiques proprement dits (seuil de cisaillement et viscosité principalement) au rhéomètre. Le test d'affaissement au cône a été effectué sur les recettes de RPC conformément à la norme ASTM C939 à l'aide du cône standard d'Abrams (diamètre supérieur : 100 mm, diamètre inférieur : 200 mm et hauteur : 300 mm) et/ou du petit cône d'affaissement (diamètre supérieur : 50 mm, diamètre inférieur : 100 mm et hauteur : 150 mm). Le petit cône est utilisé pour de raisons d'économie des matériaux. Un facteur de conversion évalué à 2,29 a été appliqué pour corrélérer les mesures au petit cône à celles au cône standard. La température du RPC a été préalablement prélevée à l'aide d'un thermomètre technique, avant le déroulement des essais rhéologiques (Figure 3a).

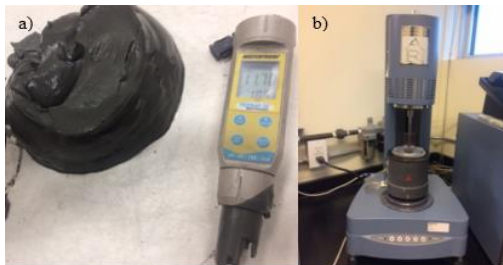


Figure 3. Appareillage utilisé pour les essais rhéologiques : a) Thermomètre PC S testr 35 et b) Rhéomètre AR2000 de TA instruments

La procédure *steady state flow step (SSFS)* a été utilisée pour cisailier les matériaux dans le Rhéomètre rotatif AR2000 de TA instruments (Figure 3b). Cette procédure a consisté à appliquer un taux de cisaillement constant au matériau et à observer la variation de la contrainte de cisaillement. Au point d'équilibre (après 30 secondes), correspondant à la stabilisation de la variable observée, la valeur est prélevée et une incrémentation automatique du taux de cisaillement est réalisée. L'incrémenter de la variable était réalisée en mode « up and down flow » (écoulement ascendant et descendant). L'essai a été réalisé en triplicata et toutes les courbes

d'écoulement ont été lissées suivant le modèle de Herschel-Buckley et celles de viscosité par le modèle de Cross.

La caractérisation mécanique du RPC a été réalisée uniquement par détermination de la valeur de l'UCS. La presse électromécanique rigide asservie MIS 10/GL de capacité maximale 50 kN a été utilisée à cette fin. Pour ce faire, des moules plastiques cylindriques de 50,8 mm de diamètre et 101,6 mm de hauteur ont été remplis en 3 couches et en triplicata. Vingt-cinq (25) coups de la barre métallique de 1 cm de diamètre ont été appliqués à chaque couche pour libérer le maximum de bulles d'air emprisonnées dans la masse du RPC avant d'éliminer le surplus. Les moules fermées hermétiquement ont été ensuite placées dans une chambre de cure (humidité relative supérieure à 90% et température 23 ± 2 °C). Trois temps de cure différents ont été considérés : 7, 28 et 90 jours.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Influence des paramètres de malaxage sur l'affaissement au cône des mélanges de RPC

Les résultats de l'étude de la variation de l'affaissement au cône des mélanges de RPC en fonction de la durée de malaxage (mélanges M01 à M05 du tableau 4) sont présentés sur la figure 4 ci-dessous.

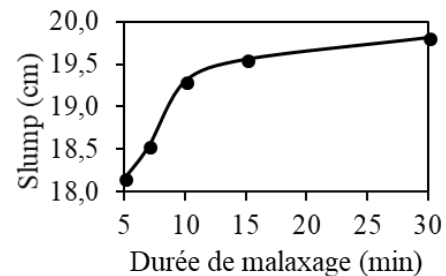


Figure 4. Variation de l'affaissement au cône des mélanges de RPC préparés dans le malaxeur Hobart à 166 rpm en fonction de la durée de malaxage

Cette figure montre que l'affaissement au cône des mélanges de RPC augmentent avec la durée de malaxage. Il passe de 18,1 à 20,3 cm lorsque la durée de malaxage passe de 5 à 30 min. Ce gain d'environ 12 % traduit une amélioration de la consistance et de la fluidité du RPC. On peut observer sur la même figure que pour des durées de malaxage inférieures à 10 minutes, la valeur de l'affaissement au cône augmente assez rapidement. Par contre, le taux d'augmentation de l'affaissement au cône s'estompe légèrement lorsque la durée de malaxage dépasse 10 minutes. Les mélanges M06 à M08 (voir tableau 4) ont été utilisés pour étudier de la vitesse de malaxage sur l'affaissement au cône du RPC. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5. Cette dernière montre que l'augmentation de la vitesse de malaxage permet d'améliorer la consistance du RPC. En effet, les valeurs de

l'affaissement au cône passent de 17,5 à 18,9 cm lorsque la vitesse de malaxage varie de 91 à 282 rpm.

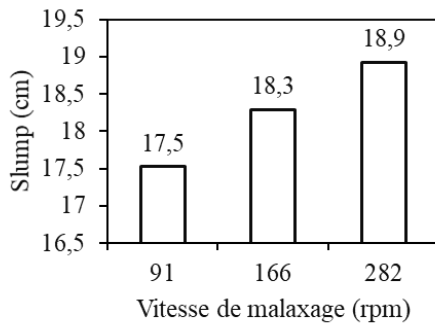


Figure 5. Variation de l'affaissement au cône des mélanges de RPC en fonction de la vitesse de malaxage

La figure 6 montre la variation de l'affaissement au cône avec la masse de charge du malaxeur. Ces résultats sont issus des mélanges M09 à M12 (voir tableau 4). On observe sur cette figure une légère diminution de l'affaissement au cône lorsque la masse malaxée augmente dans une zone des valeurs relativement faibles (inférieures à environ 9,5 kg). Pour des valeurs de masses de charge du malaxeur supérieures à 9,5 kg, une augmentation de l'affaissement au cône est observée.

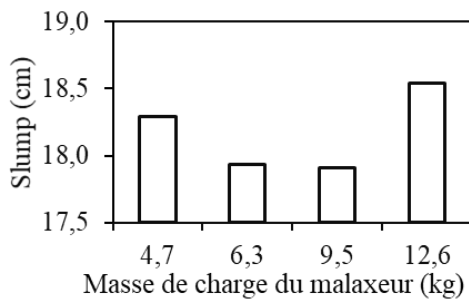


Figure 6. Variation de l'affaissement au cône des mélanges de RPC préparés dans le malaxeur Hobart à 166 rpm en fonction de la masse de charge du malaxeur

3.2 Effet de la durée de malaxage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC

Les courbes d'écoulement descendants obtenues en variant la durée de malaxage sur les mélanges susmentionnés sont présentées sur la figure 7. Les valeurs de température mesurées sur le RPC frais sont les suivantes : 24,7°C, 24,9°C, 25°C, 25°C et 25,5°C pour les durées de malaxage de 5, 7, 10, 15 et 30 minutes. Ces rhéogrammes permettent d'analyser de manière approfondie les paramètres du modèle d'écoulement de Herschel-Buckley, à savoir le seuil de cisaillement τ_{HB} et l'indice d'écoulement n_{HB} . L'indice de consistance K n'est pas présenté ici en raison de la variation des indices d'écoulement (Björn et al. 2012; Ouattara et al. 2017b).

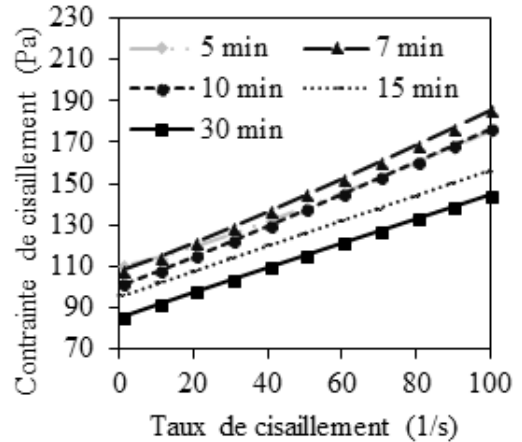


Figure 7. Rhéogrammes descendants des RPCs ($m = 4,7$ kg) préparés à différentes durées de malaxage à 166 rpm

La Figure 8 présente la variation de τ_{HB} et n_{HB} avec la durée de malaxage. On peut y observer une tendance généralisée à la diminution du seuil de cisaillement et de l'indice d'écoulement avec l'augmentation de la durée de malaxage. Le seuil de cisaillement passe de 110 Pa à 85 Pa lorsque la durée de malaxage augmente de 5 à 30 minutes, soit une variation de 22,7 %. Cette figure montre également que ce RPC semble afficher un comportement rhéoépaississant ($n > 1$) lorsque la durée de malaxage est inférieure à 15 minutes. La variation de la viscosité au taux de cisaillement à l'infini (appelé, viscosité à l'infini) avec la durée de malaxage a été également évaluée (voir Figure 9). On y observe une diminution importante de la viscosité à l'infini avec l'augmentation de la durée de malaxage. Lorsque celle-ci devient supérieure à 15 minutes, la diminution de la viscosité à l'infini tend à s'estomper.

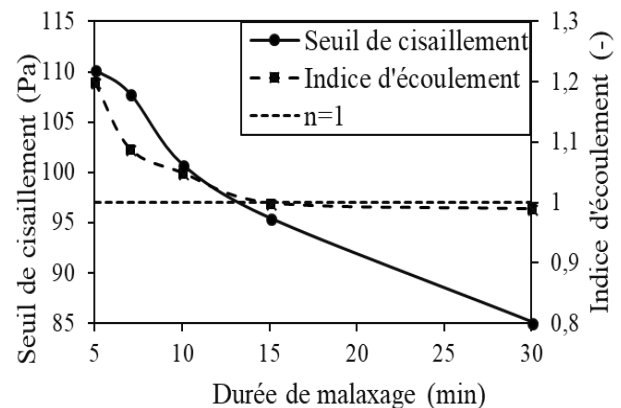


Figure 8. Seuil de cisaillement et indice d'écoulement des RPCs ($m = 4,7$ kg) préparés dans le malaxeur Hobart tournant à 166 rpm en fonction de la durée de malaxage

La figure 10 montre la variation de l'UCS et du gain de résistance du RPC avec la durée de malaxage. À 7 jours de cure, la valeur de l'UCS augmente avec la durée de malaxage et atteint une valeur de 506 kPa à 15 minutes correspondant à un gain de résistance de 7,9% par rapport

à la résistance observée à 5 minutes de malaxage. Le gain de résistance chute ensuite à 4,3% à 30 minutes de malaxage.

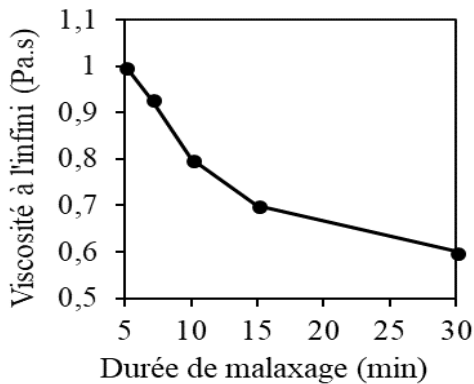


Figure 9. Variation de la viscosité à l'infini des mélanges de RPC (m = 4,7 kg) préparés dans le malaxeur Hobart tournant à 166 rpm avec la durée de malaxage

À 28 jours de cure, on observe deux pics de gain de résistance à 7 minutes de malaxage (5,7%) et à 30 minutes de malaxage (9,3%). À long terme (90 jours), on observe moins des fluctuations du gain de résistance en fonction de la durée de malaxage. Cette durée contribue à améliorer l'homogénéité des mélanges. Par l'action de malaxage, les vides initialement occupés par l'air sont réduits et la porosité du mélange diminue (Yilmaz et al. 2011). Cela a pour conséquence de consolider le squelette solide du RPC. C'est pourquoi la valeur de l'UCS tend à augmenter avec la durée de malaxage. Une agitation mécanique trop élevée peut toutefois modifier la microstructure dans la matrice du RPC.

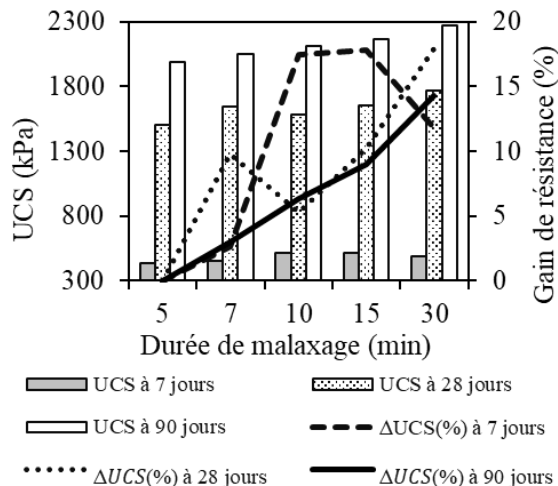


Figure 10. Variation de l'UCS et du gain de résistance avec la durée de malaxage des RPCs (m = 4,7 kg) préparés dans le malaxeur Hobart tournant à 166 rpm

3.3 Effet de la vitesse de malaxage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC

L'effet de la variation de la vitesse de malaxage sur le comportement rhéologique du RPC à base des résidus de la mine A a été étudié à l'aide des mélanges M06 à M08 (voir tableau 4). Les valeurs de la température mesurées étaient de 24,8°C; 25°C et 25,3°C. La variation du seuil de cisaillement et de la viscosité à l'infini issus du lissage des rhéogrammes descendants des mélanges de RPC (non présentés ici) est présentée à la figure 11. On observe sur cette figure une diminution du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la vitesse de malaxage. Ce seuil de cisaillement passe de 120; 111 à 105 Pa lorsque la vitesse de malaxage varie de 91, 166 à 282 rpm. La viscosité à l'infini diminue également en fonction de l'augmentation de la vitesse de malaxage. La valeur de l'indice d'écoulement était presque constante (1,2) avec la variation de la vitesse de malaxage.

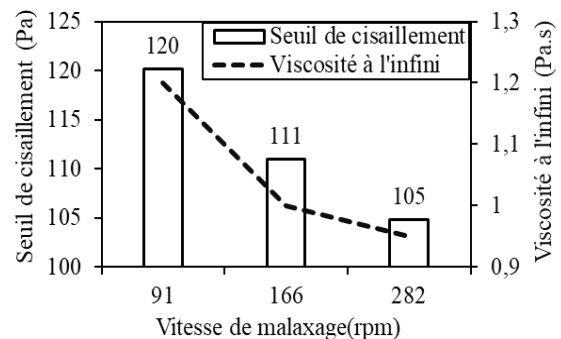


Figure 11. Effet de la variation de la vitesse de malaxage sur le seuil de cisaillement et la viscosité à l'infini des mélanges de RPC (m = 4,7 kg) préparés dans le malaxeur Hobart pendant 5 minutes

La figure 12 montre l'influence de la vitesse de malaxage sur l'UCS du RPC préparé avec les résidus de la mine A. On peut observer une légère augmentation de l'UCS avec la vitesse de malaxage. Les valeurs de l'UCS passent de 478 à 502 kPa, de 1584 à 1640 kPa et de 1952 à 2008 kPa respectivement à 7, 28 et 90 jours lorsque la vitesse de malaxage augmente de 91 à 282 rpm.

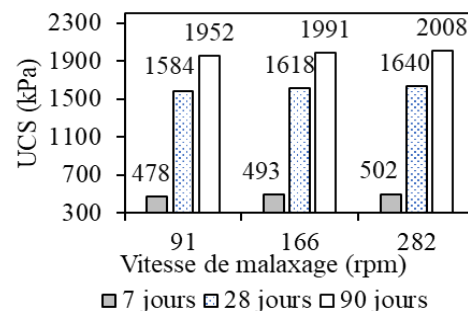


Figure 12. Variation de l'UCS des mélanges de RPC (4,7 kg) préparés dans le malaxeur Hobart tournant pendant 5 minutes avec la vitesse de malaxage

Le faible développement de l'UCS à faible vitesse peut être expliquée par l'insuffisance de l'effort de malaxage ne permettant pas de briser l'ensemble des agglomérats présents dans le mélange. Cela rend difficile l'atteinte du degré d'homogénéité recherché et affecte par conséquent le processus d'acquisition de la résistance mécanique. En effet, le lien entre l'homogénéité et l'acquisition de la résistance mécanique des mélanges de RPC au cours du temps de cure réside en ce sens que les hétérogénéités dans le mélange peuvent altérer le processus d'hydratation du liant.

Le gain de résistance enregistré lorsque la vitesse de malaxage passe de 166 à 282 rpm est relativement faible (en moyenne 1,5%) en comparaison à celui enregistré lorsque cette vitesse passe de 91 à 166 rpm (en moyenne 2,6 %). L'effet de l'augmentation de la vitesse de malaxage est donc plus important lorsque le malaxeur tourne à la vitesse de 166 rpm. Pour une vitesse de 282 rpm, l'agitation mécanique est plus importante et la structure de la matrice RPC commence éventuellement à être affectée. Ce qui ralentit le développement de l'UCS.

3.4 Effet de la masse de charge du malaxeur sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du RPC

La figure 13 montre la variation du seuil de cisaillement et de l'indice d'écoulement en fonction de la masse de charge du malaxeur. Cette figure montre que le seuil de cisaillement a tendance à augmenter lorsque la masse de charge est relativement faible. On observe ensuite une diminution remarquable du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la masse de charge du malaxeur lorsque la masse de charge devient importante. On peut aussi noter la forte diminution de l'indice d'écoulement avec l'augmentation de la masse de charge du malaxeur. Les valeurs de l'indice d'écoulement indiquent un comportement rhéoépaississant du RPC ($n > 1$).

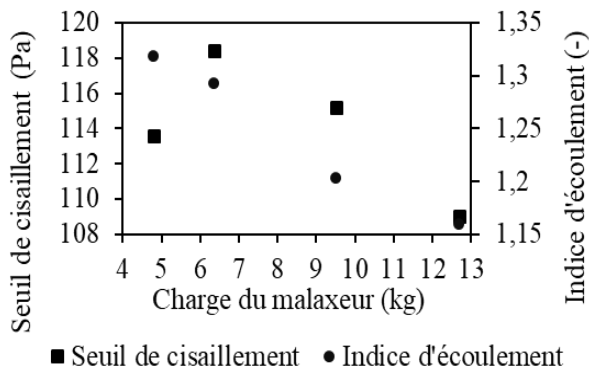


Figure 13. Variation du seuil de cisaillement et de l'indice d'écoulement des mélanges de RPC préparés dans le malaxeur Hobart tournant à 166 rpm pendant 5 minutes en fonction de la masse de charge du malaxeur

La figure 14 ci-dessous présente la variation de la viscosité à l'infini avec la masse de charge du malaxeur. Cette dernière montre que la tendance générale de la

viscosité à l'infini en fonction de l'augmentation de la masse de charge du malaxeur est plutôt une diminution. En effet, la viscosité à l'infini varie de 1,2 à 0,7 Pa.s lorsque la masse de charge augmente de 4,7 à 12,6 kg.

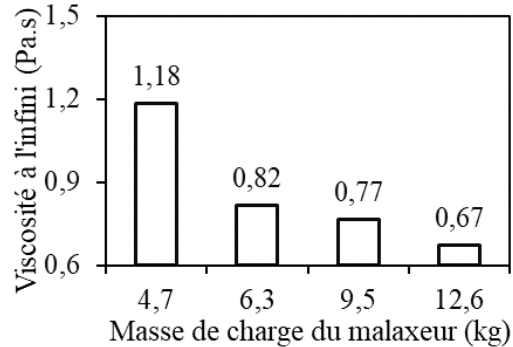


Figure 14. Variation de la viscosité à l'infini des mélanges de RPC en fonction de la masse de charge du malaxeur

La variation de l'UCS du RPC préparé dans le malaxeur Hobart tournant à 166 rpm en fonction de la masse de charge du malaxeur est montrée sur la figure 15 ci-dessous.

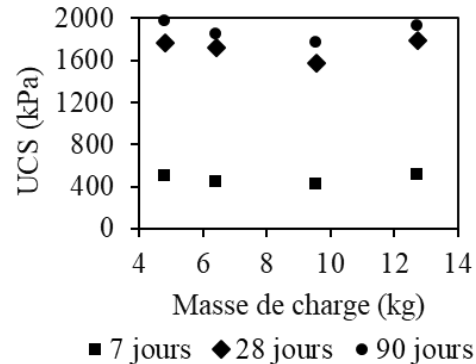


Figure 15. Variation de l'UCS des mélanges de RPC préparés dans le malaxeur Hobart tournant à 166 rpm pendant 5 minutes avec la masse de charge

La variation de la résistance mécanique à court terme (7 jours), à moyen terme (28 jours) et à long terme (90 jours) du RPC avec la variation de la masse de charge du malaxeur semble avoir la même tendance. On observe d'abord une légère diminution de l'UCS avec l'augmentation de la masse de charge du malaxeur dans une zone comprise entre 4,7 et 9,5 kg. Une valeur minimale de l'UCS du RPC est atteinte lorsque le malaxeur est chargé autour de 9,5 kg (449 kPa à 7 jours de cure, 1625 kPa à 28 jours). Ensuite, pour les valeurs de la masse de charge du malaxeur supérieures à 9,5 kg, l'UCS augmente progressivement pour atteindre 520 kPa et 1842 kPa à 12,6 kg respectivement à 7 et 28 jours). L'augmentation de l'UCS avec la masse de charge du malaxeur pourrait s'expliquer par la réduction des espaces vides entre les pales et le fond de la cuve (ou bol) du malaxeur. Cela

augmente le frottement entre les particules solides et contribue davantage à briser les agglomérations dans la masse du RPC. Le processus d'homogénéisation s'en trouve donc amélioré. Cela dit, pour des masses de charge plus faibles (inférieures à 9,5 kg), l'augmentation de l'UCS avec la diminution de la masse de charge nécessite des études supplémentaires pour comprendre ce phénomène.

4 CONCLUSION

Cette étude a montré l'influence que peut exercer la variation des paramètres de malaxage pendant la phase d'optimisation des mélanges de RPC au laboratoire sur leurs propriétés rhéologiques et mécaniques. Il a été observé que l'augmentation de la durée et de la vitesse de malaxage a un effet positif aussi bien sur les propriétés rhéologiques que sur les propriétés mécaniques du RPC préparé dans le malaxeur Hobart. En effet, lorsque la durée de malaxage augmente de 5 à 30 minutes, on observe une amélioration des propriétés rhéologiques (augmentation de l'affaissement au cône d'environ 12 % et une diminution du seuil de cisaillement estimée à 22,7 %). Une diminution des propriétés rhéologiques avec l'augmentation de la vitesse de malaxage a été également observée. Les résultats ont montré que l'UCS du RPC augmente avec la durée et de la vitesse de malaxage. Ce comportement est dû à un effort de malaxage plus intense induit par ces paramètres et qui favorise un mélange plus homogène entre les différents constituants du RPC. Une tendance à l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des mélanges de RPC préparés dans le malaxeur Hobart en fonction de l'augmentation de la masse de charge du malaxeur a été également observée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CRSNG dont la subvention à la découverte accordée au deuxième auteur a permis de réaliser ces travaux. Les auteurs remercient également le personnel de l'URSTM pour leur aide lors de la réalisation des travaux de laboratoire ainsi que les partenaires de l'IRME.

RÉFÉRENCES

- Amaratunga, L., and Yaschyshyn, D. 1997. Development of a high modulus paste fill using fine gold mill tailings. *Geotechnical & Geological Engineering* 15(3): 205-219.
- Belem, T., and Benzaazoua, M. 2008. Predictive models for prefeasibility cemented paste backfill mix design. *In The 3rd international conference on post-mining*. Citeseer. pp. 6-8.
- Belem, T., Benzaazoua, M., and Bussièrè, B. 2003. Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie I: De sa fabrication à sa mise en place sous terre. *In Symp. int. Apres-mines, GISOS, Gisos* ed., Nancy, France. pp. 5-7.
- Belem, T., Benzaazoua, M., Bussièrè, B., and Dagenais, A. 2002. Effects of settlement and drainage on strength development within mine paste backfill. *In Tailings and Mine Waste*. pp. 139-148.
- Belem, T., El Aatar, O., Bussièrè, B., and Benzaazoua, M. 2016. Gravity-driven 1-D consolidation of cemented paste backfill. *in 3-m-high columns*. *Innovative Infrastructure Solutions* 1(1): 37.
- Bell, F.G., and Donnelly, L.J. 2006. *Mining and its Impact on the Environment*. CRC Press.
- Björn, A., de La Monja, P.S., Karlsson, A., Ejlertsson, J., and Svensson, B.H. 2012. Rheological characterization. *In Biogas*. InTech.
- Creber, K.J., McGuinness, M., Kermani, M.F., and Hassani, F.P. 2017. Investigation into changes in pastefill properties during pipeline transport. *International Journal of Mineral Processing* 163: 35-44.
- Gray, N. 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology* 30(1-2): 62-71.
- Haiqiang, J., Fall, M., and Cui, L. 2016. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: experimental results. *Minerals Engineering* 92: 141-150.
- Hudson-Edwards, K.A., Jamieson, H.E., and Lottermoser, B.G. 2011. Mine wastes: past, present, future. *Elements* 7(6): 375-380.
- Landriault, D., Verburg, R., Cincilla, W., and Welch, D. 1997. Paste technology for underground backfill and surface tailings disposal applications. In Short course notes, *Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, Technical workshop œ april. p. 1997.
- Li, L., Aubertin, M., and Belem, T. 2005. Formulation of a three dimensional analytical solution to evaluate stresses in backfilled vertical narrow openings. *Canadian Geotechnical Journal* 42(6): 1705-1717.
- Mudd, G., and Boger, D. 2013. The ever growing case for paste and thickened tailings—towards more sustainable mine waste management. *Aust Inst Min Metall Bull* 2: 56-59.
- Ouattara, D., Belem, T., Mbonimpa, M., and Yahia, A. 2017a. Effect of superplasticizers on the consistency and unconfined compressive strength of cemented paste backfills. *Mise en garde*: 167.
- Ouattara, D., Yahia, A., Mbonimpa, M., and Belem, T. 2017b. Effects of superplasticizer on rheological properties of cemented paste backfills. *International Journal of Mineral Processing* 161: 28-40.
- Yilmaz, E., Belem, T., and Benzaazoua, M. 2015. Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions. *Engineering Geology* 185: 52-62.
- Yilmaz, E., Belem, T., Bussièrè, B., and Benzaazoua, M. 2011. Relationships between microstructural properties and compressive strength of consolidated and unconsolidated cemented paste backfills. *Cement and Concrete Composites* 33(6): 702-715.