

COMPORTEMENT EN COMPRESSION DE POTEAUX EN BETON ARMÉ INCORPORANT DE LA POUDRE DE VERRE

Arame Niang, Nathalie Roy, Arezki Tagnit-Hamou et Karim Bengougam

Groupes Béton et Structure

Département de génie civil, Université de Sherbrooke

RÉSUMÉ

Les bétons binaires et ternaires sont recommandés pour les ouvrages d'art du fait que ces bétons sont plus écologiques (remplacement d'une partie de ciment) et qu'ils présentent une bonne imperméabilité aux ions chlore. Cet article de conférence rend compte d'une étude innovatrice portant sur le comportement en compression de poteaux en béton armé incorporant de la poudre de verre (PV). Le but de cette étude est de s'assurer que ces bétons rencontrent les critères de performance requis pour les applications structurales. Trois séries de six poteaux ont été testés sous compression uniaxiale. Les variables de l'étude sont la géométrie (section circulaire et carré), la configuration des étriers, les quantités d'armature longitudinale et transversale et le type de béton. Une série de six poteaux confectionnés avec les bétons de rapport $E/L = 0,40$ ont été testés à 28 jours. Les deux autres séries de six poteaux confectionnés avec les bétons de rapport $E/L = 0,55$ ont été testés à 28 et 91 jours respectivement. Pour chaque série, trois poteaux sont fabriqués de béton contenant 20% de PV en remplacement de la masse du ciment et les trois autres de béton contenant 0% de PV.

Les résultats montrent que, pour un rapport $E/L = 0,40$, l'ajout de 20% de PV retarde la fissuration de l'enrobage de béton et améliore légèrement la capacité portante ainsi que la réponse post-pic des poteaux testés entre 28 et 30 jours. Le comportement ductile des poteaux avec 20% de PV est similaire ou excède ceux des poteaux incorporant 0% de PV. Cette différence de performance pourrait être attribuée à la plus grande densité de la pâte du béton incorporant la poudre de verre.

Pour les rapports $E/L = 0,55$, la résistance en compression à 28 jours (cure dans chambre humide) et à 30 jours (cure sous jute) des cylindres de bétons avec 20% PV est plus faible que celle des cylindres de béton contenant 0% de PV. Cette valeur plus faible de la résistance en compression des cylindres avec PV pourrait être attribuée d'une part à l'augmentation du rapport eau/ciment (E/C), qui résulte en une baisse de la quantité d'éléments réactifs, et, d'autre part, à l'influence du type de cure. Les poteaux incorporant 20% de PV ont une capacité portante légèrement plus faible mais leur réponse post-pic est semblable à celles des poteaux en béton avec 0% de PV. Pour $E/L = 0,55$, les résultats (charges à l'apparition des premières fissures, charges aux pics, charges à la première perte de l'enrobage) pour les colonnes avec PV testées entre 90 et 92 jours sont légèrement inférieurs à ceux avec 0% de PV. Toutefois, la différence est plus petite qu'elle ne l'est dans le cas des poteaux de même rapport E/L et testés entre 28 et 30 jours. Un gain de ductilité dans le cas des poteaux incorporant de la PV et testés entre 90 et 92 jours est observé.

Au terme de cette étude, les résultats obtenus aux différentes phases du projet montrent que le béton incorporant de la poudre de verre présente un bon comportement structural.

Introduction

L'incorporation de la PV dans le béton en remplacement du ciment constitue un avantage économique et écologique. L'utilisation de la PV en remplacement du ciment entraînerait d'une part la réduction de la quantité de ciment utilisée dans la construction des infrastructures et d'autre part la durabilité des ouvrages. Des études menées sur la perméabilité aux ions chlore du béton incorporant la PV montre que ce dernier présente une très bonne résistance à la pénétration des ions chlorure. Un avantage écologique important de l'usage de la PV dans le béton est qu'une bonne quantité de verres mixte sera détournée des sites d'enfouissement.

Avec l'augmentation des quantités de verre mixte et l'application de la nouvelle législation du Québec sur le recyclage du verre, il est nécessaire de trouver de nouvelles alternatives d'utilisation de ce verre. Ainsi, la SAQ a lancé un programme de valorisation du verre mixte en finançant la recherche sur la valorisation. En 2004, la chaire SAQ sur la valorisation du verre dans les matériaux a vu le jour à l'Université de Sherbrooke. Cette chaire a plusieurs objectifs, mais dans cet article, nous présenterons l'incorporation de la poudre de verre dans la fabrication du béton pour la confection d'éléments structuraux tels que les poteaux en béton armé. En effet, l'introduction de la PV dans le béton est plutôt nouvelle dans le domaine de la recherche et il y a peu d'essais effectués sur l'élément structural directement.

Au Canada la majeure partie des infrastructures routières est exposée aux ions chlorures avec ou sans gel-dégel. Le ministère des transports du Québec (MTQ) recommande l'utilisation du béton type V et V-S pour les ouvrages d'art. Ce béton a un rapport E/L = 0,40 et est fabriqué avec du ciment type GUB-SF pour un dosage minimal en liants de 340 kg/m³ ou du ciment type GUB-S/SF, GUB-F/SF pour un dosage minimal en liants de 365 kg/m³. La taille maximale des granulats est de 20 mm, la teneur en air doit être comprise entre 5 et 8%, l'affaissement doit être compris entre 120 ± 30 mm et la résistance en compression doit être de 35 MPa à 28 jours. Le liant GUB-SF doit contenir 8% de fumée de silice et les liants GUB-S/SF et GUB-F/SF doit contenir 5% de fumée de silice et 15% de cendre volante ou laitier. Toutefois la valeur de la perméabilité aux ions chlorures doit être égale à 1500 C et 1000 C à 56 jours pour les bétons type V et V-S respectivement. Ainsi en se basant sur les exigences de la MTQ les questions suivantes sont posées :

- Est-ce possible d'utiliser la PV comme ajout cimentaire dans le béton en vue d'améliorer ces propriétés?
- Les bétons avec PV présentent-ils un bon comportement structural?
- Est-ce que ce type de béton respectera les exigences de performance du MTQ?

Méthodologie

Les essais de compression sur poteau ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique (MTS311) rigide d'une capacité 11414 kN. Les déformations axiales des poteaux sont mesurées à l'aide de potentiomètres sur des longueurs de mesure de 400 et 800 mm (voir figure 1). Les déformations des barres d'acier sont mesurées à l'aide des jauges de déformation placées au niveau des barres longitudinales à mi-hauteur, des étriers intérieurs et extérieurs situés à égale distance de part et d'autre du centre du poteau. Pour chaque étrier, les jauges sont collées sur deux côtés consécutifs.

Durant les essais, le déplacement axial et la déformation transversale des colonnes ont été les paramètres de base à mesurer. Pour assurer une rupture au centre du poteau, les poteaux ont été élargis au niveau des extrémités où des collets métalliques ont été installés afin de représenter le confinement à la connexion poteau-poutre d'une construction réelle. Le taux de chargement en contrôle de force était de 2,5 kN/sec jusqu'à 2500 kN. Ensuite, le taux de chargement de contrôle de force passe en contrôle de déplacement à un taux 0,002 mm/sec. Lorsque la charge axiale post-pic atteint 2/3 de la charge maximale, la vitesse de chargement passe de 0,002 mm/sec à 0,01 mm/sec. La charge d'arrêt est atteinte lorsqu'elle chute à 50% de la charge maximale.



Figure 1: Dispositif expérimental des essais sur poteaux

Résultats

Propriétés à l'état frais

Le tableau 1 représente la composition des mélanges des bétons utilisés pour la confection des spécimens. Le tableau 2 présente les propriétés à l'état frais des différents bétons. L'essai d'affaissement a été effectué selon la norme CSA A23.2-5C et l'essai de la teneur en air selon la norme CSA A23.2-4C.

Tableau 1: Composition des mélanges

Matériaux	Unité	T0.40	B0.40	T0.55	B0.55
Ciment GU	Kg/m ³	400	320	350	280
Poudre de verre	Kg/m ³	--	80	--	70
Eau	Kg/m ³	160	160	192,5	192,5
Sable 0-5 mm	Kg/m ³	690	667	645	630
Granulat 5-14	Kg/m ³	856	856	856	856
Granulat 10-20	Kg/m ³	214	214	214	214
AEA (Airextra)	ml/m ³	420	440	--	--
AEA (Airex-L)	ml/m ³	--	--	178	126
SP (Plastol5000)	ml/m ³	2315	2170	--	--

Tableau 2: Propriétés des bétons à l'état frais

Béton	E/L	Affaissement		% d'aire		Masse volumique	
		Gâchée 1	Gâchée 2	Gâchée 1	Gâchée 2	Gâchée 1	Gâchée 2
Tem0.40	0,40	170	220	8,4	8,4	2246	2248
Bin0.40	0,40	190	185	7,2	7,0	2294	2310
Tem0.55-28j	0,55	135	190	7,3	6,0	2294	2304
Bin0.55-28j	0,55	165	-	6,2	-	2259	-
Tem0.55-91j	0,55	150	-	6,0	-	2254	-
Bin0.55-91j	0,55	155	-	6,0	-	2274	-

Propriétés à l'état durci : Résistance en compression

Cure en chambre humide- La figure 2 représente les résultats des essais de compression des différents bétons utilisés dans ce projet. Ces essais ont été effectués sur des cylindres de béton mûris dans la chambre de mûrissement (humidité relative de 100% avec une température de 23°C). Les résultats montrent que, pour un même rapport E/L = 0,40 et E/L = 0,55, le béton avec 0 % de PV présente une meilleure résistance à la compression que le béton avec 20 % de PV à jeune âge jusqu'à 28 jours. Entre 28 et 91 jours, on note une augmentation progressive de la résistance du béton avec 20 % de PV qui devient supérieure ou presque égale à celle des bétons avec 0 % de PV. La faible valeur de la résistance en compression à jeune âge des bétons avec PV est, comme pour les autres ajouts cimentaires, due à la lenteur de la réaction pouzzolanique.

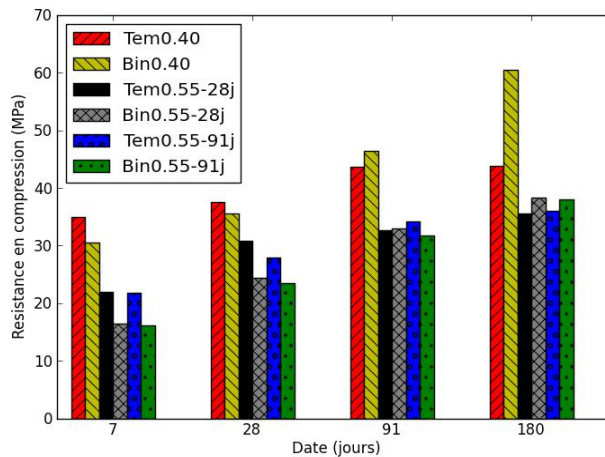


Figure 2: La résistance en compression des différents bétons utilisés (Cure en chambre humide)

7 j de cure sous jute humide et puis à l'air jusqu'au jour de l'essai - Pour les mêmes conditions de cure que les poteaux, la résistance en compression des bétons est quasi la même soit 42,2 MPa pour le béton avec 0 % de PV et 41,8 MPa pour le béton avec 0 % de PV avec un E/L = 0,40. Contrairement aux bétons de rapport E/L = 0,40, la résistance en compression du béton avec PV, pour un rapport E/L = 0,55 ayant servi à la confection des poteaux testé à 28 j, qui est égale à 27 MPa est plus faible que celle du béton témoin qui est de 31,2 MPa. Pour les bétons de rapport E/L = 0,55 ayant servi à la confection des poteaux testé à 91 j, la résistance en compression des bétons est de 34,1 MPa pour le béton témoin et 27,4 MPa pour le béton fabriqué avec de la PV en

remplacement de la masse du ciment. Dans des conditions de mûrissement parfaites (*mûrissement dans la chambre humide*), la résistance en compression à 91 jours est de 34,2 MPa pour le béton témoin et 31,7 MPa pour le béton avec PV.

Les résultats obtenus confirment ceux de Tagnit-Hamou et al (2012), Shayan et al (2006), Schwarz et al (2007) sur le fait que l'ajout de PV entraîne une perte de la résistance à jeune âge, mais augmente progressivement jusqu'à dépasser son témoin équivalent à des âges plus avancés.

Perméabilité aux ions chlore

Les essais de perméabilité aux ions chlore ont été effectués sur des spécimens à 28, 56, 91 et 180 jours selon la norme ASTM C1202. La figure 3 montre les résultats des essais des différents bétons utilisés. Dans tous les cas, à 28 jours la perméabilité aux ions chlore des bétons est élevée à l'exception du béton avec PV de rapport E/L = 0.40 qui présente une perméabilité modérée. Cette faible valeur de la perméabilité du béton avec PV pourrait être attribuée au degré de raffinement des pores de ce béton à cet âge. La perméabilité aux ions chlore des bétons avec PV baisse très rapidement en passant de modérée à faible pour le Bin0.40 et de élevée à modérée pour les Bin0.55-28j et Bin0.55-91j entre 28 et 56 j. Celle des bétons témoin demeure par contre élevée entre 28 et 56 j. Entre 56 et 91 jours, la perméabilité des bétons avec PV passe de faible à très faible pour le béton avec PV de rapport E/L = 0,40 et passe de modérée à faible pour les bétons avec PV de rapport E/L= 0,55. La perméabilité des bétons témoin demeurent élevée jusqu'à 180 j à l'exception du témoin de rapport E/L = 0,40 qui a une perméabilité modérée à 180 j. À 180 jours, la perméabilité des bétons avec PV devient très faible. Les résultats des essais à 180 jours des bétons Tem55-91j et Bin0.55-91j ne sont pas disponibles.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de la poudre de verre en remplacement de la masse du ciment réduit de manière significative la perméabilité aux ions chlore du béton. Le béton avec PV présente une meilleure résistance à la pénétration des ions chlorures que son témoin équivalent. Ainsi les résultats obtenus à ces trois phases viennent confirmer les résultats obtenus par Shayan et al (2006), Schwarz et al (2008a), Zidol (2009) et Wang et al (2009).

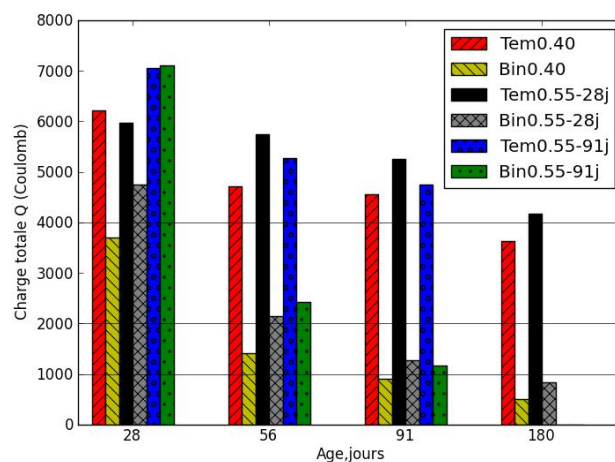


Figure 3: Perméabilité aux ions chlore des différents bétons

Comportement des poteaux

Le tableau 3 présente dans l'ordre, la charge axiale à l'apparition des premières fissures P_F , la charge axiale maximale supportée par le poteau P_{\max} , la charge relative sur le poteau qui est le rapport de la charge maximale P_{\max} sur la charge théorique $P_o = 0.85f'_cA_c$, la charge à la première perte de l'enrobage P_E , la déformation ε_{C50U} qui est la déformation axiale du béton non armé quand la contrainte diminue jusqu'à la limite ultime du béton non confiné $0,5f'_c$, la déformation ε_{C50C} qui est la déformation correspondant à 50% de la résistance maximale du béton confiné sur la partie descendante de la courbe contrainte déformation et le rapport $\varepsilon_{C50C}/\varepsilon_{CO}$ qui est un indicateur de la ductilité (la déformation ε_{CO} qui est la déformation correspondant à 50% de la résistance maximale du cylindre de béton).

La figure 4a illustre les courbes charge axiale sur le poteau en fonction de la déformation axiale des poteaux confectionnés avec les bétons de rapport E/L = 0,40 et testés à 28 jours. Les données ont été recueillies à partir des potentiomètres de longueur de mesure 400 et 600 mm. L'écart entre les courbes au niveau du pic et à la partie descendante pourrait s'expliquer par une différence de propagation des fissures dans les bétons ainsi que la différence de perte de l'enrobage.

La charge à la première fissuration varie de 3316 à 5212 kN (voir tableau 3). L'écart entre les charges à la première fissuration est de 10 % pour les poteaux de configuration A, 13 % pour les poteaux de configuration B et 5 % pour les poteaux de configuration C. La charge axiale maximale supportée par les poteaux varie de 3363 à 5218 kN soit un écart de 7 %, 7 % et 3,5 % pour les configurations A, B et C respectivement. L'écart entre la charge à la première perte de l'enrobage est de 10 %, 13 % et 4,3 % pour les configurations A, B et C respectivement et plus élevé dans le cas des poteaux confectionnés avec le béton incorporant la PV. La charge relative sur les poteaux P_{\max}/P_o varie entre 0,86 et 1,7 pour les poteaux fabriqués avec les bétons de E/L = 0,40. Ce rapport est plus élevé dans le cas des bétons incorporant la PV.

Le rapport $\varepsilon_{C50C}/\varepsilon_{CO}$ qui est un indicateur de la ductilité est de 10,14, 17,41 (Pot400) et 11,86 (Pot600) pour les bétons confinés contenant 0% PV et est de 16,00, 18,43 (Pot400) et 11,86 (Pot600) pour les bétons confinés incorporant 20% de PV selon les configurations A, B et C respective. Les valeurs les plus élevées de ce rapport ($\varepsilon_{C50C}/\varepsilon_{CO}$) sont obtenues avec les poteaux contenant 20% de PV.

Contrairement aux résultats obtenus des poteaux confectionnés avec les bétons de rapport E/L = 0,40 et testés à 28 jours, les poteaux avec 0 % de PV sont plus performants que les poteaux incorporant 20 % de PV pour un rapport E/L = 0,55 et testés entre 28 jours. L'écart entre les charges à l'apparition de premières fissures est de 6 % pour les poteaux de configuration A et 18 % pour les poteaux de configuration C. Pour les poteaux de configuration B, la charge à l'apparition de premières fissures n'a pas pu être déterminée visuellement. La charge axiale maximale sur les poteaux varie entre 2591 kN et 3825 kN et est plus élevée au niveau des poteaux sans PV. L'écart entre les charges axiales des poteaux de même configuration est de 6, 11,6, 17,5 % pour les poteaux de configuration A, B et C respectivement. L'écart entre les charges à la première perte de l'enrobage est de 5, 6 et 13 % pour les configurations A, B et C

respectivement, plus élevé dans le cas des poteaux témoins. Cet écart plus élevé au niveau des poteaux de configuration C pourrait être dû à un problème de mise en place du béton.

La figure 4b illustre les courbes de la charge axiale sur le poteau versus la déformation axiale des poteaux testés à 28 jours pour un rapport $E/L = 0,55$. La charge relative sur les poteaux P_{\max}/P_o varie entre 0,87 et 0,99 pour les poteaux confectionnés avec les bétons de $E/L = 0,55$ et testés à 28 jours (voir tableau 3).

Le rapport $\varepsilon_{c50C}/\varepsilon_{c0}$ est de 19,81, 33,09 (Pot400) et 11,57 (Pot600) pour les bétons confinés contenant 0% PV et est de 17,39, 34,50 (Pot400) et 19,94 (Pot600) pour les bétons confinés incorporant 20% de PV selon les configurations A, B et C respectivement. Les valeurs les plus élevées de ce rapport ($\varepsilon_{c50C}/\varepsilon_{c0}$) sont obtenues en majorité avec les poteaux contenant 20% de PV. Ainsi, le béton avec 20% de PV pour un rapport $E/L = 0,55$ présente une ductilité plus élevée ou quasi semblable à celui du béton avec 0% de PV. Pour les potentiomètres de longueur de mesure 400 mm et 600 mm, le rapport $\varepsilon_{c50C}/\varepsilon_{c0}$ des bétons confinés varie de 5,3 à 15,1 fois supérieur au rapport $\varepsilon_{c50U}/\varepsilon_{c0}$ pour les bétons témoins et de 6,5 à 12,9 pour les bétons avec 20% de PV.

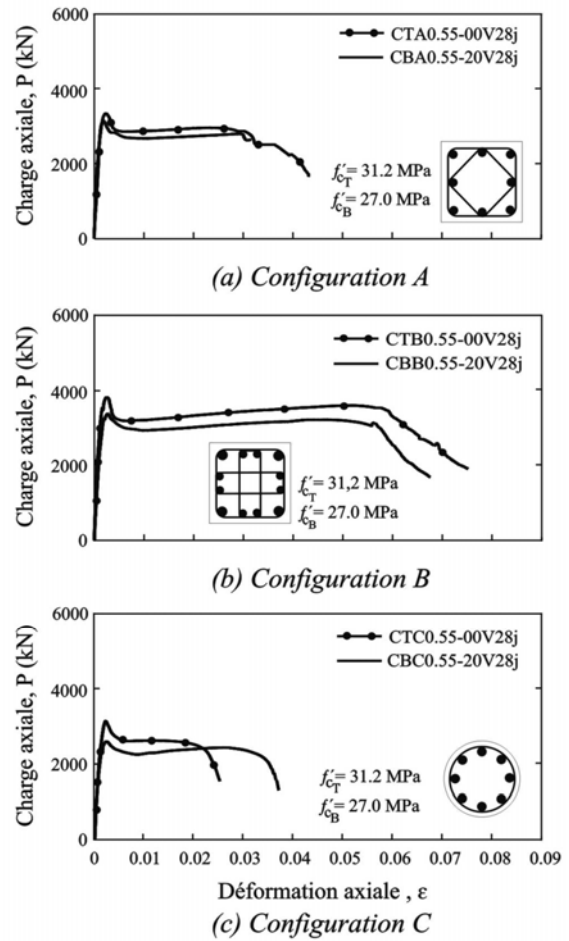
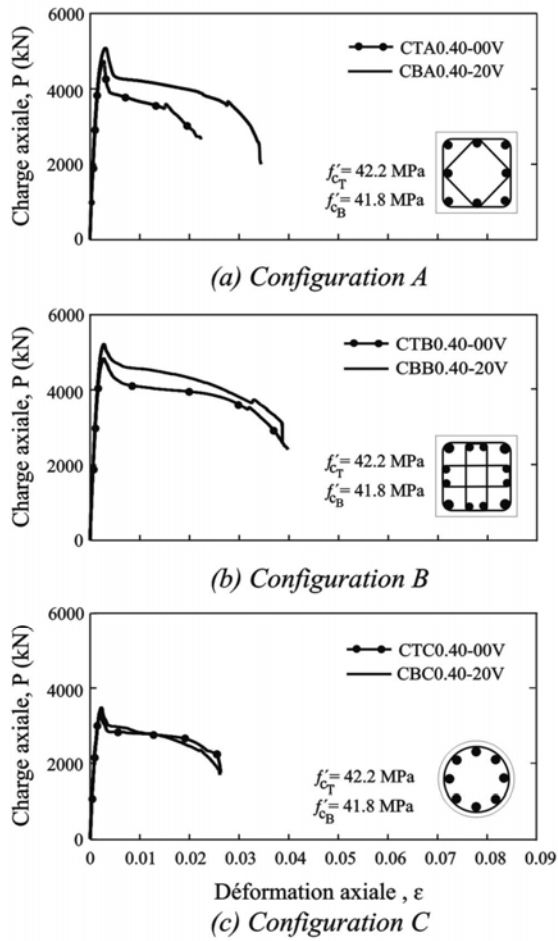
La figure 5 illustre les courbes charge axiale en fonction de la déformation axiale des poteaux confectionnés avec les bétons de rapport $E/L = 0,55$ et testés à 91 jours. L'écart entre les charges axiales à l'apparition des premières fissures est de 5, 5 et 6 % selon les configurations A, B et C respectivement. La charge axiale maximale P_{\max} supportée par les poteaux confectionnés avec les bétons de $E/L = 0,55$ et qui sont testés à 91 j varie de 3006 à 4071 kN. L'écart entre les charges axiales maximales des poteaux de même configuration mais de béton différent est de 5, 5 et 6 % pour les configurations A, B et C respectivement. Comparativement aux résultats obtenus avec les poteaux testés à 28 j pour un $E/L = 0,55$, l'apparition des premières fissures et la première perte d'enrobage survient aussi plus tardivement au niveau des poteaux fabriqués avec le béton de $E/L = 0,55$ et contenant 0 % de PV. L'écart entre les charges axiales sur les poteaux à la première perte de l'enrobage est de 7, 8 et 2% pour les configurations A, B et C respectivement (voir tableau 3). La charge relative sur les poteaux varie entre 0,93 et 1,05. En comparant les résultats obtenus avec les poteaux pour un rapport $E/L = 0,55$, une diminution de l'écart entre les charges axiales est notée selon la date d'essai mais les bétons avec 0% de PV demeure plus performants. Cette amélioration de la performance des bétons pourrait être due à l'hydratation progressive de la PV avec le temps.

Le rapport $\varepsilon_{c50C}/\varepsilon_{c0}$ est de 30,75, 27,15 (Pot400) et 15,6 (Pot600) pour les bétons confinés contenant 0% PV et est de 29,68, 43,00 (Pot400) et 13,00 (Pot600) pour les bétons confinés incorporant 20% de PV selon les configurations A, B et C respective. Les valeurs les plus élevées de ce rapport ($\varepsilon_{c50C}/\varepsilon_{c0}$) sont obtenus en majorité avec les poteaux contenant 0% de PV. Ainsi, le béton avec 0% de PV pour un rapport $E/L = 0,55$ et testé à 91 jours présente une ductilité plus élevée ou quasi semblable à celui du béton avec 20% de PV. Pour les potentiomètres de longueur de mesure 400 mm et 600 mm, le rapport $\varepsilon_{c50C}/\varepsilon_{c0}$ des bétons confinés varie de 6,52 à 12,81 fois supérieur au rapport $\varepsilon_{c50U}/\varepsilon_{c0}$ pour les bétons témoins et de 5,14 à 17,00 pour les bétons avec 20% de PV.

La différence de performance entre les poteaux confectionnés avec les bétons de E/L = 0,55 à 91 jours pourrait s'expliquer par la différence de résistance en compression entre les bétons contenant 0% et 20% de PV soit 4,2 MPa et 6,7 MPa plus élevé avec le béton contenant 0% de PV selon les dates d'essais 30 j* et 91j* respectivement.

Tableau 3: Charge axiale et déformation axiale des poteaux

Column	P_F (kN)	P_{max} (kN)	P_{max}/P_o -	P_E (kN)	ϵ_{C50U}	ϵ_{C50C} -	ϵ_{CO} -	$\epsilon_{C50C}/\epsilon_{CO}$
CTA0.40-00V	4575	4738	0,99	3825	0,0050	0,0223	0,0022	10,14
CBA0.40-20V	5079	5082	1,07	4256	0,0038	0,0336	0,0021	16,00
CTB0.40-00V	4536	4835	0,97	4235	0,0050	0,0383	0,0022	17,41
CBB0.40-20V	5212	5218	1,05	4858	0,0038	0,0387	0,0021	18,43
CTC0.40-00V	3316	3363	0,86	2852	0,0050	0,0261	0,0022	11,86
CBC0.40-20V	3480	3484	0,89	2979	0,0038	0,0249	0,0021	11,86
CTA0.55-00V28J	3327	3363	0,87	2853	0,0046	0,0416	0,0021	19,81
CBA0.55-20V28J	3129	3136	0,91	2695	0,0048	0,0313	0,0018	17,39
CTB0.55-00V28J	3285	3825	0,96	3582	0,0046	0,0695	0,0021	33,09
CBB0.55-20V28J	ND	3382	0,93	3370	0,0048	0,0621	0,0018	34,50
CTC0.55-00V28J	3140	3141	0,99	2637	0,0046	0,0243	0,0021	11,57
CBC0.55-20V28J	2570	2591	0,89	2286	0,0048	0,0359	0,0018	19,94
CTA0.55-00V91J	3892	3900	0,96	3380	0,0048	0,0615	0,0020	30,75
CBA0.55-20V91J	3705	3709	1,05	3132	0,0048	0,0564	0,0019	29,68
CTB0.55-00V91J	4068	4071	0,96	3701	0,0048	0,0543	0,0020	27,15
CBB0.55-20V91J	3868	3876	1,04	3402	0,0048	0,0817	0,0019	43,00
CTC0.55-00V91J	3199	3207	0,93	2802	0,0048	0,0313	0,0020	15,65
CBC0.55-20V91J	3001	3006	1,01	2753	0,0048	0,0247	0,0019	13,00



(a)

(b)

Figure 4 Courbe charge axiale sur poteau en fonction de la déformation axiale : (a) ($E/L = 0,40$, testés à 28 j), (b) ($E/L = 0,55$, testés à 28 j)

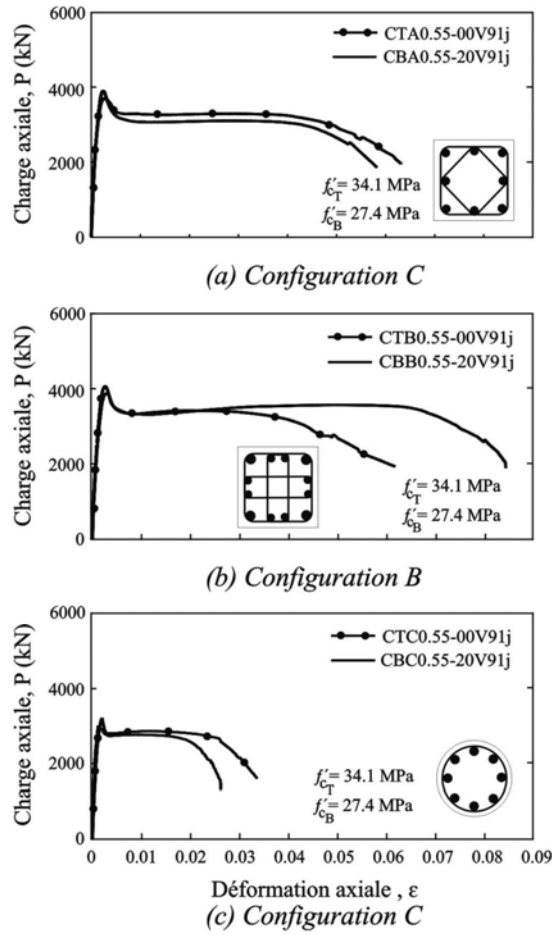


Figure 5 Courbe charge axiale sur poteau en fonction de la déformation axiale : ($E/L=0,55$, testés à 91 j)

Discussion

Ces travaux de recherche ont permis de mettre en évidence le comportement structural des bétons incorporant 20 % de poudre de verre (PV) pour des rapports E/L = 0,40 testés à 28 j et pour E/L = 0,55 testés à 28 j ainsi qu'à 91 j.

Les résultats obtenus, montrent que l'ajout de la poudre de verre en remplacement de la masse du ciment réduit de manière significative la perméabilité aux ions chlorures du béton. Le béton avec PV présente une meilleure résistance à la pénétration des ions chlorures que son témoin équivalent.

Pour le béton avec 0 % de PV les résistances sont plus élevées à jeune âge jusqu'à 28 jours que celles du béton avec 20 % de PV. Au delà de 28 jours, une augmentation graduelle des résistances du béton avec 20 % de PV est notée. À 91 jours, pour les spécimens ayant subi la cure en chambre humide, le même rapport E/L = 0,40 ou 0,55, la résistance en compression du béton avec 20 % de PV en remplacement de la masse du ciment est plus élevée que celle du béton avec 0 % de PV pour E/L = 0,40 tandis qu'elles sont quasi identiques pour les bétons de E/L = 0,55.

Pour E/L = 0,40, les cylindres avec et sans PV, ayant subi la même cure que les poteaux, montrent relativement la même résistance en compression à la date d'essais des poteaux (28 jours). Pour E/L = 0,55, la résistance en compression des cylindres incorporant la PV, ayant subi la même cure que les poteaux, est inférieure à celle des cylindres avec 0% de PV. La faible valeur de la résistance en compression des cylindres avec PV peut être attribuée à l'augmentation du rapport eau/ciment (E/C) qui résulte à une baisse de la quantité d'éléments réactifs. Par ailleurs, les bétons qui ont servi à la confection des poteaux testés à 28 j pour E/L = 0,55, la différence entre les résistances mesurées sur les cylindres ayant subi la même cure que les poteaux pour tous les rapports E/L peut être en partie attribuée à l'influence de la cure. En effet, la différence entre la résistance en compression du béton avec et sans PV et testés à 28 jours est de 6,4 MPa et 4,2 MPa pour les cylindres muris dans la chambre de murissement et ceux ayant subi la même cure que les poteaux respectivement. Pour les bétons qui ont servi à la confection des poteaux testés à 91 j pour E/L = 0,55, la différence entre la résistance en compression du béton avec et sans PV et testés à 91 jours est de 2,5 MPa et 6,7 MPa pour les cylindres muris dans la chambre de murissement et ceux ayant subi la même cure que les poteaux respectivement.

Les poteaux confectionnés avec le béton contenant 20% de PV en remplacement du ciment de E/L = 0,40 restent plus performants que les poteaux fabriqués avec le béton incorporant 0% de PV. La capacité est plus élevée au niveau des poteaux dont le béton contient 20% de PV selon les configurations A, B et C respectivement. L'apparition des premières fissures et la première perte d'enrobage surviennent plus tardivement au niveau des poteaux dont le béton contient de la PV. La résistance en compression des poteaux étant quasi les mêmes, alors pour une même configuration des étriers cette différence de performance pourrait être attribué à la densité de la pâte du béton incorporant la poudre de verre.

Une augmentation du rapport E/L de 0,40 à 0,55 entraîne une diminution de la performance des poteaux incorporant la PV. Les poteaux ont été testés à 91 jours car la résistance en compression des cylindres avec PV issus de la chambre de murissement et testés à 28 jours est plus faible que celle des cylindres sans PV. D'un autre côté, à 91 jours, la résistance en compression des cylindres incorporant la PV issus de la chambre de murissement est similaire ou légèrement plus

faible à celle des cylindres sans PV. La différence entre les résistances des cylindres avec et sans PV à 91 jours est inférieure à celle des cylindres avec et sans PV testés à 28 jours. Les résultats montrent un gain de résistance dans le temps des bétons incorporant de la PV dans le temps. Les poteaux fabriqués avec le béton incorporant 0% de PV restent plus performants, mais l'écart entre les charges a nettement diminué à 91 jours comparé aux résultats obtenus à 28 jours.

Les résultats obtenus montrent que le béton avec poudre de verre présente un bon comportement structural. Les bétons avec PV présente une ductilité supérieure où quasi semblable à ceux sans PV pour $E/L = 0,40$. Pour $E/L = 0,55$, la ductilité des bétons avec PV est quasi semblable où inférieure à ceux des bétons avec 0% de PV. Cependant, l'influence de la cure sur ces bétons devrait être étudiée.

Conclusion

L'ajout de la poudre de verre améliore de manière significative les propriétés du béton. La résistance du béton avec PV augmente progressivement jusqu'à égaler ou même dépasser celle de son témoin équivalent. La faible valeur de la résistance en compression à jeune âge des bétons avec PV est, comme pour les autres ajouts cimentaires, due à la lenteur de la réaction pouzzolanique.

Les valeurs de la perméabilité de ce béton diminuent rapidement et sont de loin plus faible que celles de leur témoin équivalent à 56 jours. Pour le béton contenant 20% en remplacement du ciment, de rapport $E/L=0,40$, la valeur de la perméabilité de ce béton répond aux exigences de la MTQ en ce qui concerne les bétons pour la confection d'ouvrage d'art. Les bétons de rapport $E/L=0,55$, malgré leur faible valeur de la résistance en compression présente toute même une bonne imperméabilité aux ions chlorures.

Les bétons avec poudre de verre présentent un bon comportement structural. Pour une même configuration des étriers et une même géométrie des poteaux, les bétons avec PV présentent le même comportement élastique et une ductilité quasi semblable à celui de son témoin. Les bétons avec 20% de PV pour un rapport $E/L=0,40$ pourrait éventuellement être utilisé dans la confection d'ouvrage d'art. Ces bétons présentent une meilleure performance comparés à leur témoin équivalent et très bonne imperméabilité aux ions chlorures.

Travaux futurs

Une étude comparative entre le comportement des poteaux fabriqués avec des bétons binaires et ternaires incorporant la PV à celui des bétons binaires et ternaires incorporant des ajouts cimentaires normalisés tels que la fumée de silice, la cendre volante ou le laitier est programmée. Ces bétons binaires et ternaires devront répondre aux exigences de la MTQ.

Bibliographie

Tagnit-Hamou, A. et Bengougam, A. (2012). The use of glass powder as supplementary cementitious material.

Shayan, A. et Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, volume 36, numéro 3, p. 457-68.

Schwarz, N., DuBois, M. et Neithalath, N. (2007). Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, volume 29, numéro 9, p. 656-66.

Schwarz, N., Cam, H. et Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, volume 30, numéro 6, p. 486-96.

Ablam, Z. (2009). Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaire. Thèse de l'Université de Sherbrooke-Génie- Génie civil, 156 p.

Wang, Z., Shi, C. et Song, J. (2009). Effect of glass powder on chloride ion transport and alkali-aggregate reaction expansion of lightweight aggregate concrete. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, volume 24, numéro 2, p. 312-317.