

OPTIMISATION DE LA FINESSE DE LA POUDRE DE VERRE
DANS LES SYSTÈMES CIMENTAIRES BINAIRES

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Composition du jury :

Richard Gagné, Rapporteur
Arezki Tagnit-Hamou, Directeur
Said Laldji, Co-directeur
Mladenka Saric, Membre externe

Ablam ZIDOL

Sherbrooke (Québec), Canada

Mars 2009



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-70791-3
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-70791-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

RÉSUMÉ

L'utilisation des ajouts minéraux connaît un essor de plus en plus considérable à la fois en raison des considérations économiques mais encore plus en raison de la prise de conscience des aspects environnementaux et de la philosophie de développement durable qui s'introduit dans les activités de Génie Civil. Le développement de matériaux cimentaires alternatifs locaux se révèle également important. Le verre mixte mis en décharge accentue les problèmes environnementaux par la pollution et le gaspillage d'espace pouvant servir à des fins plus utiles. L'objectif premier de ce travail est de valoriser ce verre mixte en explorant son emploi comme matériau cimentaire alternatif. Différents taux de substitution de deux poudres de verre broyé et de poussière générée par le concassage du verre ayant de finesse égales ou légèrement inférieures à celle du ciment Portland type GU sont incorporés dans les coulis, mortiers et bétons. Trois différentes catégories de bétons ont été étudiées dans ce projet, à savoir les bétons conventionnels, les bétons à haute performance et les bétons autoplaçants.

Les études sur les coulis ont permis d'évaluer leur demande en eau et en adjuvants chimiques en présence de la poudre de verre. Les essais sur mortiers ont permis d'examiner l'activité pouzzolanique des poudres ainsi que leur performance dans le contrôle de la réaction alcalis-granulats (RAG). Les effets de la poudre de verre sur les propriétés à l'état frais des bétons et leur performance dans le béton à l'état durci sont évalués. Les résultats de nos études permettent de retenir que :

- La poudre de verre, de finesse similaire à celle de ciment, améliore l'ouvrabilité et son maintien dans le temps pour les systèmes cimentaires binaires étudiés. La demande en superplastifiant des systèmes cimentaires binaires est inférieure à celle du témoin;
- La poudre de verre broyé recèle un potentiel pouzzolanique intéressant;
- La poudre réduit l'expansion due à la RAG tant dans les mortiers que dans les bétons;
- Dans les bétons avec $E/L = 0,40$, la poudre de verre réduit la demande en superplastifiant mais augmente le dosage en agent entraîneur d'air (AEA);
- La poudre a une réactivité lente occasionnant de faibles résistances à jeune âge;
- Les bétons contenant la poudre de verre résistent au gel-dégel et s'écaillent moins;
- La poudre améliore la durabilité des bétons par réduction de leur pénétrabilité ;
- La poudre peut remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans le béton.

Mots Clés : Verre mixte – Poudre de verre – Matériau cimentaire alternatif - Pouzzolanité

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, je tiens tout d'abord à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon Directeur de mémoire, Prof. Arezki TAGNIT-HAMOU, pour son entière disponibilité, ses conseils et ses directives pertinentes tout au long de cette étude.

J'adresse mes chaleureux remerciements au Programme Canadien de Bourse de la Francophonie (PCBF) pour son éminent soutien financier de ce programme d'études.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr. Saïd LALDJI, co-directeur de ce mémoire, pour son entière disponibilité. Il ne ménage aucun effort pour nous prodiguer d'utiles conseils, des directives pertinentes et faire des suivis réguliers de nos travaux pour nous faciliter l'avancement dans le projet.

Je remercie tout le personnel du Groupe de recherche sur le ciment et le béton de l'Université de Sherbrooke, les professeurs, les assistants de recherche et les techniciens, en particulier Ghislaine LUC, Rajko VOJNOVIC, Denis BOLDUC et Claude FAUCHER pour leur collaboration et leurs conseils tout au long de notre phase d'étude expérimentale.

Je remercie particulièrement Galal FARES et David HARBEC pour leur collaboration ponctuelle dans les essais de caractérisation au MEB et à la DRX des poudres.

J'exprime ma reconnaissance à ELAGUAB Messaoud Yacine, pour ses coups de mains durant les essais sur les BAP.

J'adresse mes profonds remerciements à mon Dieu pour ses œuvres palpables dans ma vie; et à mes parents, frères et sœurs pour leur encouragement, soutien et surtout leur amour fraternel. Je leur dédie ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

<i>Chapitre 1</i>	<i>INTRODUCTION</i>	1
<i>Chapitre 2</i>	<i>SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	5
2.1	Ajouts cimentaires supplémentaires	5
2.1.1	Fumées de silice	5
2.1.2	Filler	7
2.1.3	Pouzzolanes naturelles.....	8
2.1.4	Laitier	8
2.1.5	Cendres volantes.....	9
2.2	Ajouts cimentaires supplémentaires alternatifs	10
2.2.1	CAISifrit	10
2.2.2	Verre	12
<i>Chapitre 3</i>	<i>PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS</i>	27
3.1	Introduction	27
3.2	Plan expérimental	27
3.3	Matériaux utilisés	29
3.3.1	Ciment	29
3.3.2	Poussière de verre (P7).....	29
3.3.3	Poudre de verres broyés.....	29
3.3.4	Adjuvants chimiques	30
3.3.5	Sable d'Ottawa	31
3.3.6	Granulats fins.....	31
3.3.7	Gros granulats.....	31
3.3.8	Eau de gâchage	31
3.4	Essais de caractérisation des matériaux.....	31
3.4.1	Caractéristiques physiques des matériaux	32
3.4.2	Caractéristiques chimiques du ciment et des poudres de verre	35
3.4.3	Caractéristiques minéralogiques du ciment et des poudres de verre	36

3.5	Essais sur pâtes et mortiers.....	39
3.5.1	Essais sur pâtes	39
3.5.2	Essais sur mortiers	42
3.6	Essais sur bétons.....	43
3.6.1	Affaissement.....	45
3.6.2	Masse volumique.....	46
3.6.3	Teneur en air du béton frais.....	46
3.6.4	Température.....	47
3.6.5	Étalement.....	48
3.6.6	Capacité de remplissage	48
3.6.7	J-Ring	49
3.6.8	V-Funnel.....	50
3.6.9	L-Box.....	51
3.6.10	Colonne de ségrégation	51
3.6.11	Rhéologie.....	53
3.6.12	Temps de prise.....	55
3.6.13	Prélèvement des échantillons et mûrissement	55
3.6.14	Résistance à la compression	56
3.6.15	Résistance en traction par fendage	56
3.6.16	Résistance en flexion	57
3.6.17	Module d'élasticité	58
3.6.18	Retrait de séchage.....	59
3.6.19	Réseau d'air dans le béton durci.....	60
3.6.20	Résistance au gel-dégel	61
3.6.21	Résistance à l'écaillage.....	61
3.6.22	Pénétrabilité des ions chlore.....	62
3.6.23	Résistance à la réaction alcalis-granulats sur bétons.....	64
<i>Chapitre 4</i>	<i>PRÉSENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....</i>	<i>65</i>
4.1	Caractérisation des matériaux.....	65

4.1.1	Caractéristiques physiques	65
4.1.2	Caractéristiques minéralogiques.....	68
4.1.3	Caractéristiques chimiques.....	71
4.2	Pâtes et mortiers	72
4.2.1	Pâtes.....	72
4.2.2	Mortiers	77
4.3	Optimisation des mélanges de bétons.....	82
4.4	Bétons conventionnels.....	83
4.4.1	Paramètres d'ouvrabilité.....	83
4.4.2	Temps de prise.....	84
4.4.3	Résistance à la compression	85
4.4.4	Résistance en traction par fendage	87
4.4.5	Résistance en flexion	88
4.4.6	Module d'élasticité	89
4.4.7	Caractéristiques du réseau d'air dans le béton durci	91
4.4.8	Durabilité aux cycles de gel-dégel rapides.....	93
4.4.9	Résistance à l'écaillage.....	95
4.4.10	Pénétrabilité des ions chlorures	97
4.4.11	Retrait de séchage.....	99
4.4.12	Résistance à la réaction alcalis-granulats sur des prismes de bétons	100
4.5	Bétons à haute performance	102
4.5.1	Paramètres d'ouvrabilité.....	102
4.5.2	Temps de prise.....	103
4.5.3	Résistance à la compression	104
4.5.4	Résistance en traction par fendage	106
4.5.5	Résistance en flexion	107
4.5.6	Module d'élasticité	108
4.5.7	Caractéristiques du réseau d'air dans le béton durci	109
4.5.8	Durabilité aux cycles de gel-dégel rapides.....	111

4.5.9	Résistance à l'écaillage.....	113
4.5.10	Pénétrabilité des ions chlorures.....	115
4.5.11	Retrait de séchage.....	116
4.6	Comportement de la poudre de verre dans les mélanges E/L = 0,55 comparé à celui des mélanges E/L = 0,40.....	118
4.7	Bétons autoplaçants E/L = 0,40.....	120
4.7.1	Demande en adjuvants chimiques.....	120
4.7.2	Déformabilité.....	121
4.7.3	Stabilité statique.....	123
4.7.4	Stabilité dynamique.....	124
4.7.5	Propriétés rhéologiques.....	128
4.7.6	Résistance à la compression.....	129
4.7.7	Module d'élasticité.....	131
4.7.8	Retrait de séchage.....	132
4.8	Analyse récapitulative.....	134
	<i>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</i>	136
	<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	139
	<i>ANNEXES</i>	148

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Effet de la poudre de verre sur l'affaissement [TAHA et coll., 2008a]	13
Figure 2.2	Effet de la poudre sur l'étalement relatif des pâtes par rapport au témoin [SCHWARZ et coll., 2007]	14
Figure 2.3	Effet de la poudre sur le degré d'hydratation des pâtes [SCHWARZ et coll., 2007]	15
Figure 2.4	Porosité capillaire en fonction du taux de substitution [SCHWARZ et coll., 2007]	16
Figure 2.5	Évolution de la conductivité de la solution des pores capillaires en fonction du taux de substitution par la poudre de verre [SCHWARZ et coll., 2007]	16
Figure 2.6	Résistance à la compression des mortiers incorporant poudre de verre [SHAYAN et coll., 2004]	17
Figure 2.7	Activité pouzzolanique de la poudre de verre [SHI et coll., 2005b]	18
Figure 2.8	Résistance à la compression des mélanges de béton de poudre de verre et fumée de silice comparées au témoin [SHAYAN et coll., 2004]	19
Figure 2.9	Résistance à la compression des bétons étudiés [SHAYAN et coll., 2006]	19
Figure 2.10	Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression des bétons à 28 jours [TAHA et coll., 2008a]	20
Figure 2.11	Résistance à la compression des bétons E/L=0,42 [SCHWARZ et coll., 2007]	20
Figure 2.12	Résistance à la compression des bétons incorporant poudre de verre [SCHWARZ, 2008b]	21
Figure 2.13	Effet de la poudre de verre sur les résistances en traction et en flexion des bétons [TAHA et coll., 2008a]	21
Figure 2.14	Résistance en flexion sur des prismes de bétons à 130 jours [SHAYAN et coll., 2006]	22
Figure 2.15	Module d'élasticité dynamique sur des cylindres de bétons [SHAYAN et coll., 2006]	22
Figure 2.16	Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [SHAYAN et coll., 2004]	23
Figure 2.17	Résistance à la réaction alcalis-granat des bétons, 38 °C et 100 % HR [SHAYAN et coll., 2006]	24
Figure 2.18	Expansion due à la RAG à 23°C [SHI et coll., 2005b]	24

Figure 2.19	<i>Amélioration de la résistance au gel-dégel par la poudre de verre [TURGUT, 2008].....</i>	<i>25</i>
Figure 2.20	<i>Pénétrabilité des ions chlorures [SHAYAN et coll., 2006].....</i>	<i>25</i>
Figure 2.21	<i>Pénétrabilité des ions chlorures [SCHWARZ, 2008b].....</i>	<i>26</i>
Figure 2.22	<i>Retrait de séchage sur des prismes de bétons [SHAYAN et coll., 2006].....</i>	<i>26</i>
Figure 3.1	<i>Image d'un pycnomètre à hélium [JONQUIERES, 2007].....</i>	<i>32</i>
Figure 3.2	<i>Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine [PHOUMMAVONG, s.d.].....</i>	<i>34</i>
Figure 3.3	<i>Schéma de principe d'un appareil de fluorescence X dispersif en longueurs d'onde (A) et un exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon [EBERHART, 1997, MARTIN et GEORGE, 1998].....</i>	<i>36</i>
Figure 3.4	<i>Une microscopie électronique à balayage (A) et interaction entre un faisceau et la surface de l'échantillon (B) [DUVAL et coll., s.d.].....</i>	<i>37</i>
Figure 3.5	<i>Principe de la chambre de Debye-Scherrer (A) et principe de la loi de Wulff-Bragg (B) [PHILIPPON, s.d.].....</i>	<i>38</i>
Figure 3.6	<i>Essai Mini-slump [Tiré du Laboratoire du cours GCI 712 Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, 2007].....</i>	<i>40</i>
Figure 3.7	<i>Dimension du Cône de Marsh (Cône d'écoulement) [PHOUMMAVONG, s.d.].....</i>	<i>41</i>
Figure 3.8	<i>Essai accéléré de la réaction alcalis-granulat sur les barres de mortiers.....</i>	<i>43</i>
Figure 3.9	<i>Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams [NORME NFP 18-451]</i>	<i>46</i>
Figure 3.10	<i>Mesure de la teneur en air du béton frais.....</i>	<i>47</i>
Figure 3.11	<i>Mesure de l'étalement du BAP [Swedish Concrete Association, 2002].....</i>	<i>48</i>
Figure 3.12	<i>Évaluation de la capacité de remplissage [Yurugi et coll., 1989].....</i>	<i>49</i>
Figure 3.13	<i>Essai de J-Ring [Swedish Concrete Association, 2002].....</i>	<i>50</i>
Figure 3.14	<i>Entonnoir en V [Swedish Concrete Association, 2002].....</i>	<i>50</i>
Figure 3.15	<i>Essai de l'écoulement en L [Swedish Concrete Association, 2002].....</i>	<i>51</i>
Figure 3.16	<i>Colonne de l'essai de ségrégation [Assaad et coll., 2004].....</i>	<i>52</i>
Figure 3.17	<i>Représentation schématique du rhéomètre [Beaupré, 1994].....</i>	<i>54</i>
Figure 3.18	<i>Géométrie de la palette utilisée pour le rhéomètre (A) et Surface cylindrique formée par la palette en mouvement (B) [Beaupré, 1994].....</i>	<i>55</i>
Figure 3.19	<i>Mode de rupture des éprouvettes cylindriques à la compression [PHOUMMAVONG, s.d.].....</i>	<i>56</i>
Figure 3.20	<i>Dispositif de l'essai de traction par fendage [PHOUMMAVONG, s.d.].....</i>	<i>57</i>
Figure 3.21	<i>Essai de flexion.....</i>	<i>58</i>
Figure 3.22	<i>Courbe de contrainte-déformation [TERRIER, 2005].....</i>	<i>59</i>
Figure 3.23	<i>Mesure du retrait de séchage.....</i>	<i>60</i>

Figure 3.24	Dispositif de l'essai de pénétrabilité aux ions chlore [Notes de cours de durabilité, Automne 2007]	63
Figure 3.25	Essai de la réaction alcalis-granulats sur prismes de bétons [FOURNIER, s.d.]	64
Figure 4.1	Proportion relative des grosseurs des particules des ciments et poudres étudiées	67
Figure 4.2	Courbes granulométriques des ciments et poudres de verres étudiées	67
Figure 4.3	Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon du ciment GU.....	68
Figure 4.4	Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon de la poudre de verre 6×25.....	68
Figure 4.5	Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon de la poudre de verre 9×25.....	69
Figure 4.6	Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon de la poussière de verre	69
Figure 4.7	Spectre de la DRX du ciment GU	70
Figure 4.8	Spectre de la DRX de la poudre de verre	70
Figure 4.9	Étalement des coulis incorporant la poudre 6×25	73
Figure 4.10	Étalement des coulis incorporant la poudre 9×25	73
Figure 4.11	Illustration de l'amélioration de l'ouvrabilité après 120 min.....	74
Figure 4.12	Écoulement des mélanges témoin et de 6×25 à 5 min.....	75
Figure 4.13	Écoulement des mélanges témoin et de 9×25 à 5 min.....	75
Figure 4.14	Écoulement des mélanges témoin et de 6×25 à 60 min.....	76
Figure 4.15	Écoulement des mélanges témoin et de 9×25 à 60 min.....	76
Figure 4.16	Résistance à la compression des mélanges témoin et de poudre 6×25	79
Figure 4.17	Résistance à la compression des mélanges témoin et de poudre 9×25	79
Figure 4.18	Résistance à la compression des mélanges témoin et de poussière.....	80
Figure 4.19	Expansion due à la réaction alcalis granulats sur mortiers	81
Figure 4.20	Temps de prise des bétons conventionnels.....	85
Figure 4.21	Résistance à la compression des bétons conventionnels	87
Figure 4.22	Gains de résistance à la compression des bétons conventionnels.....	87
Figure 4.23	Résistance en traction par fendage des bétons conventionnels.....	88
Figure 4.24	Résistance en flexion des bétons conventionnels.....	89
Figure 4.25	Modules d'élasticité des bétons conventionnels	90
Figure 4.26	Comparaison de la teneur en air à l'état frais et durci des bétons E/L = 0,55.....	92
Figure 4.27	Facteur d'espacement et surface spécifique des bulles d'air dans les bétons conventionnels	92

Figure 4.28	Aspects physiques des prismes des bétons conventionnels après les 300 cycles de gel dégel	94
Figure 4.29	Facteur de durabilité au gel-dégel des bétons conventionnels.....	94
Figure 4.30	Aspects physiques des plaques des bétons conventionnels après l'écaillage à 56 cycles de gel dégel en présence de sel fondant à partir de 28 jours d'âge.....	96
Figure 4.31	Pénétrabilité des ions chlorures des bétons conventionnels	99
Figure 4.32	Retrait de séchage des bétons conventionnels	100
Figure 4.33	Expansion due à la réaction alcalis-granulat sur bétons	101
Figure 4.34	Temps de prise des bétons à haute performance	104
Figure 4.35	Résistance à la compression des bétons à haute performance	105
Figure 4.36	Gains de résistance à la compression des bétons à haute performance.....	106
Figure 4.37	Résistance en traction par fendage des bétons à haute performance.....	107
Figure 4.38	Résistance en flexion des bétons à haute performance.....	108
Figure 4.39	Module d'élasticité des bétons à haute performance	109
Figure 4.40	Comparaison de la teneur en air à l'état frais et durci des BHP	110
Figure 4.41	Facteur d'espacement et surface spécifique des bulles d'air des bétons E/L = 0,40	111
Figure 4.42	Aspects physiques des prismes des bétons à haute performance après les 300 cycles de gel dégel	112
Figure 4.43	Résistance au gel-dégel des bétons à haute performance	113
Figure 4.44	Aspects physiques des plaques des bétons à haute performance après l'écaillage à 56 cycles de gel dégel en présence de sel fondant à partir de 28 jours d'âge	114
Figure 4.45	Pénétrabilité des ions chlorures des bétons à haute performance	116
Figure 4.46	Retrait de séchage des bétons à haute performance.....	117
Figure 4.47	Étalement et dosage en superplastifiant des BAP.....	122
Figure 4.48	Étalement au J-Ring.....	123
Figure 4.49	Coefficient de ségrégation des BAP.....	124
Figure 4.50	Capacité de remplissage	126
Figure 4.51	Temps d'écoulement au V-Funnel	127
Figure 4.52	Coefficient de déformabilité au L-Box.....	128
Figure 4.53	Résistance à la compression des BAP	130
Figure 4.54	Gains de résistance à la compression des BAP	131
Figure 4.55	Module d'élasticité des BAP	132
Figure 4.56	Retrait de séchage des BAP	133

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	Affaissement des bétons $E/L = 0,49$ [SHAYAN et coll., 2006]	12
TABLEAU 3.1	Récapitulation des essais effectués	28
TABLEAU 3.2	Évaluation qualitative de l'essai d'écaillage [BNQ 2621-900].	62
TABLEAU 3.3	Pénétrabilité des ions chlorures [ASTM C1202-97]	63
TABLEAU 4.1	Caractéristiques physiques des matériaux.....	66
TABLEAU 4.2	Composition chimiques des matériaux.....	71
TABLEAU 4.3	Résistance à la compression sur mortiers.....	77
TABLEAU 4.4	Indice de pouzzolanité des poudres de verre	78
TABLEAU 4.5	Mélanges des bétons conventionnels	83
TABLEAU 4.6	Propriétés à l'état frais des bétons conventionnels	84
TABLEAU 4.7	Résistance à la compression des bétons conventionnels.....	86
TABLEAU 4.8	Caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons $E/L = 0,55$	91
TABLEAU 4.9	Résistance des bétons $E/L=0,55$ exposés à l'écaillage à 28 jours d'âge.....	97
TABLEAU 4.10	Résistance des bétons $E/L=0,55$ exposés à l'écaillage à 91 jours d'âge.....	97
TABLEAU 4.11	Mélanges des bétons à haute performance	102
TABLEAU 4.12	Propriétés à l'état frais des BHP	103
TABLEAU 4.13	Résistance à la compression des BHP	105
TABLEAU 4.14	Caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons $E/L = 0,40$	110
TABLEAU 4.15	Résistance des BHP exposés à l'écaillage à 28 jours d'âge.....	114
TABLEAU 4.16	Résistance des BHP exposés à l'écaillage à 91 jours d'âge.....	115
TABLEAU 4.17	Mélanges de bétons autoplaçants	120
TABLEAU 4.18	Demande en adjuvants chimiques des BAP	121
TABLEAU 4.19	Déformabilité	121
TABLEAU 4.20	Stabilité statique.....	123
TABLEAU 4.21	Stabilité dynamique.....	125
TABLEAU 4.22	Propriétés rhéologiques mesurées sur les BAP	128
TABLEAU 4.23	Résistance à la compression des BAP.....	129
TABLEAU 4.24	Récapitulation d'amélioration des propriétés des bétons $E/L=0,55$	135
TABLEAU 4.25	Récapitulation d'amélioration des propriétés des bétons $E/L=0,40$	135

LISTE DES SYMBOLES

AC	Agent colloïdal
AEA	Agent entraîneur d'air
BAP	Béton Autoplaçant
BET	Brauner, Emmett et Teller
BHP	Béton à haute performance
cm	Centimètre
CV	Coefficient de variation
E/C_{effectif}	Eau sur ciment effectif
E/L	Eau sur liant
g ou τ	Taux de cisaillement
g/m^2	Gramme par mètre carré
GPa	Gigapascal
h ou μ	Viscosité plastique
kg/m^3	Kilogramme par mètre cube
l/m^3	Litre par mètre cube
l/kg	Litre par kilogramme
μm	Micronmètre
min	Minutes
mm	Millimètre
mm^{-1}	Par millimètre
MPa	Mégapascal
N.m	Newton mètre
N.m.s	Newton mètre seconde
R^2	Coefficient de corrélation
S	Seconde
SP	Superplastifiant
ρ	Masse volumique

Chapitre 1

INTRODUCTION

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant de la trempe de la silice après fusion. Il est fabriqué à l'aide des matières premières telles que le sable, la soude, la dolomie et le calcaire auxquelles on ajoute parfois le calcin pour abaisser la température de fusion. Il peut être utilisé dans plusieurs domaines notamment en optique pour ses propriétés réfringentes, en chimie et en industrie agroalimentaire pour sa très faible réaction avec les composantes contenues dans les contenants. C'est donc un matériau idéal pour les contenants (bouteilles, pots de yaourt, béciers, erlenmeyers, éprouvettes, tubes d'essais, etc.). Ces contenants après usage nécessitent un recyclage pour la protection de l'environnement. Certains pays tels que la France, l'Allemagne et la Suède récupèrent près de 80 % de verres mis sur le marché. Au Québec en l'an 2006, une moyenne de 117 000 tonnes de verre (soit environ 44 %) a été récupérée à travers divers systèmes. Une partie de ce verre, le verre incolore, est facilement recyclé avec une bonne valeur ajoutée, tandis que le verre mixte (verre de différentes couleurs) présente certaines appréhensions dues à l'inefficacité des systèmes du tri des verres par couleurs. Une petite quantité est valorisée (laine de verre, fibres de verre) alors qu'une grande partie est mise en décharge et occupe ainsi beaucoup d'espace qui pourrait être utilisé à d'autres fins. Ils deviennent une source de pollution et de dégradation de la nature. Il s'avère nécessaire d'envisager d'autres alternatives concourantes à la solution au problème de stockage du verre mixte. Ce qui est d'ailleurs la principale préoccupation de cette étude. L'analyse physico-chimique du verre révèle que le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. En raison de sa structure amorphe, le verre présente, en diffraction aux rayons X, un halo de diffusion, contrairement aux cristaux qui donnent des pics étroits et intenses. Sa composition chimique montre une teneur importante en silice amorphe. La silice amorphe est l'élément fondamental qui confère la propriété pouzzolanique aux ajouts cimentaires couramment utilisés dans le béton. En effet par analogie aux ajouts cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le métakaolin, la poudre de verre peut présenter un potentiel pouzzolanique notable dans un système cimentaire. Le verre peut être incorporé dans le béton comme substitut partiel ou entier aux granulats et ou sous forme de poudre en

substitution partielle du ciment. L'utilisation du verre dans le béton est relativement récente. La plupart des travaux antérieurs ont porté sur des poudres de verre de finesse soit beaucoup plus grande ou soit nettement plus petite que celle du ciment. Les résultats obtenus ont montré que les effets et performances développés par la poudre de verre en substitution partielle du ciment dans le béton sont influencés par sa finesse. Cependant les résultats ne convergent pas sur le taux de substitution et la finesse moyenne requise pour obtenir des qualités optimales du matériau final. Aucun résultat n'aborde explicitement les gains de performance en fonction de la finesse versus l'énergie de broyage requise à cette finesse qui semble être un élément prépondérant à la détermination du paramètre coût/performance. Ce paramètre demeure sans nul doute un des principaux facteurs qui faciliteraient la vulgarisation à grande échelle de cette nouvelle technique d'utilisation de la poudre de verre dans le béton. Il est donc clair que l'utilisation du verre dans le béton est encore à l'étape expérimentale et nécessite encore des études approfondies pour sa normalisation et sa vulgarisation.

L'objectif général visé par cette étude entreprise dans le cadre de la Chaire industrielle SAQ, est la valorisation du verre mixte dans les matériaux de construction afin de pallier non seulement au problème d'entreposage du verre mixte mais aussi et surtout de contribuer au développement durable par une amélioration significative des propriétés du béton, une réduction de l'émission du CO₂ et une préservation des ressources naturelles. D'un point de vue environnemental, la façon la plus simple et la plus avantageuse de diminuer la consommation de ciment Portland sans réduire la production du béton est d'utiliser les sous-produits de différentes industries en remplacement du ciment [NKINAMUBANZI et AÏTCIN, 1999 ; BOUZOUBAË et coll., 2001 ; MEHTA, 2001 ; NEHDI, 2001]. Certains sous-produits inertes peuvent être utilisés comme filler et ainsi diminuer la demande en liant, et également agir comme sites de nucléation du gel de C-S-H, par contre certains autres sous-produits possèdent une certaine réactivité hydraulique ou pouzzolanique, ce qui augmente leurs performances et les rend encore plus intéressants comme ajouts minéraux. C'est le cas du laitier, des cendres volantes, des fumées de silice et du métakaolin. Ceci favorise l'utilisation considérable de ces ajouts avec l'émergence des techniques des bétons à haute performance. L'utilisation des ajouts cimentaires dans le béton est récente en Amérique du Nord. De plus la plupart de ces ajouts cimentaires ne sont pas produits sur place dans chaque province. Ils sont alors transportés d'une région à une autre, ce qui fait augmenter leur coût et la pollution. Le

développement de nouveaux matériaux cimentaires alternatifs locaux tels que la poudre de verre présentera un double avantage indéniable tant environnemental qu'économique. Les objectifs spécifiques de cette étude sont essentiellement une optimisation de la finesse et du taux d'incorporation de la poudre de verre par l'évaluation de ses effets sur les performances des systèmes cimentaires binaires. On entend par système cimentaire binaire, un système dans lequel le liant est constitué de ciment Portland de type GU et de poudre de verre.

Étant donné que la plupart des résultats existants concernent des poudres de verre de finesse très nettement supérieure ($800 \text{ m}^2/\text{kg}$ [SHAYAN et coll. 2004 et 2006]) ou inférieure ($262 \text{ m}^2/\text{kg}$ [SCHWARZ et coll., 2007]) à celle du ciment Portland utilisé ($400 \text{ m}^2/\text{kg}$), nous jugeons intéressant d'explorer ce qu'il en est pour des poudres et poussières de verre de finesse avoisinantes à celle de ciment. Dans cette perspective notre étude consistera à optimiser la finesse de broyage du verre par évaluation des effets des poudres de verre sur les performances des systèmes cimentaires binaires tels que les coulis et les mortiers d'une part puis dans trois grandes catégories de bétons notamment bétons conventionnels, bétons à haute performance et béton autoplaçants d'autre part. Deux poudres du verre moyennement broyé de finesse similaires et légèrement inférieures à celle du ciment, et une poussière de verre ayant une finesse de même ordre que le ciment sont étudiées dans ce projet. Cette poussière de verre est générée par le concassage du verre mixte dans les centres de tri, tandis que les poudres du verre broyé sont obtenues par broyage des granulats de verre au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Une des poudres du verre moyennement broyé désignée 6×25 et la poussière de verre désignée P7 ont une finesse légèrement inférieure à celle du ciment tandis que la seconde poudre désignée 9×25 a une finesse quasi similaire à celle du ciment. Les surfaces spécifiques Blaine des poudres du verre broyé 6×25, 9×25 et celle de la poussière représentent respectivement 90 %, 105 % et 94 % de celle du ciment Portland de type GU utilisé dans ce projet. La désignation 6×25 ou 9×25 représente la durée de broyage qui correspond respectivement à une durée utile minimale de broyage de 6×25 minutes soit 150 minutes ou de 9×25 minutes soit 225 minutes d'une masse de 20 kilogrammes de granulats de verre triés et séchés. Les séquences de broyages sont séparées d'un arrêt de durée minimale de 45 minutes soit une durée totale d'arrêt de 225 minutes pour la poudre 6×25 et de 360 minutes pour la poudre 9×25. Ainsi, la transformation de 20 kilogrammes de granulats de verre en poudre de 6×25 ou de 9×25 nécessite une durée minimale respective de 375 minutes ou 585

minutes. Ces poudres sont retenues pour cette étude suite à des travaux antérieurs sur d'autres poudres et poussières de verre conduits par LALDJI et coll., 2007a. En effet leurs travaux ont porté sur des poudres de verres broyés 2×25, 5×25, 8×25 et 12×25 ayant de finesse Blaine respectives de 185, 302, 480 et 534 m²/kg puis sur des poussières P3, P4, P5 de différentes finesse. Ils ont déterminé des propriétés à l'état frais des mélanges de bétons incorporant 0 et 20 % de ces poudres, et des propriétés à l'état durci telles que la résistance à la compression. Ils choisissent suite à leurs travaux d'optimisation en se basant principalement sur la résistance à la compression, la poudre du verre broyé 12×25 [LALDJI et coll., 2007a], puisque ce mélange présente de résistance à la compression équivalente à celle du témoin dès 28 jours et le dépasse à partir de 56 jours. Par contre les mélanges incorporant les autres poudres du verre broyé notamment 2×25, 5×25 et 8×25 avaient de résistances similaires d'environ 80 % de celle du témoin à 28 jours. Cependant, les mélanges de 5×25 et 8×25 développent des gains de résistance notables au-delà de 56 jours. Entre 56 jours et 180 jours le mélange avec 5×25 développe de résistance quasi égale à celle du témoin alors que le mélange avec 8×25 présente de résistance supérieure à celle du témoin. Ceci laisse prévoir qu'une légère augmentation de la finesse de ces deux poudres pourrait améliorer significativement leur taux de développement de résistance et aussi les autres propriétés du béton. C'est la principale raison qui guide le choix de notre étude sur les poudres du verre broyé 6×25 et 9×25.

Le plan expérimental de notre étude s'articulera autour de trois principales phases. Dans la première phase, nous traiterons la caractérisation des matériaux. Dans la seconde phase seront abordés les essais sur pâtes et mortiers et la troisième phase se rapportera aux essais effectués sur les bétons notamment les bétons conventionnels, les bétons à haute performance et les bétons autoplaçants.

La structure de ce mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à une introduction générale permettant de situer notre sujet dans son contexte tout en précisant la problématique et les objectifs visés. Le deuxième chapitre traite la synthèse bibliographique relative à notre sujet, le troisième présente le programme expérimental avec des détails sur les travaux effectués et le quatrième présente les résultats puis suivi des conclusions et recommandations.

Chapitre 2

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les matériaux cimentaires prennent de plus en plus de place dans l'industrie du ciment, autant dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement. Les coûts économiques et sociaux associés à la mise en œuvre de nouveaux ouvrages ou la réfection et le remplacement des ouvrages existants imposent une amélioration constante de la performance des bétons utilisés. L'introduction des ajouts cimentaires dans les matériaux de construction a favorisé un avancement important dans l'amélioration de la qualité du béton. Les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons ont été considérablement bonifiées. Il existe actuellement deux grandes catégories d'ajouts cimentaires : les ajouts cimentaires supplémentaires et les ajouts cimentaires supplémentaires alternatifs.

2.1 Ajouts cimentaires supplémentaires

Les ajouts cimentaires supplémentaires peuvent avoir des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques. Les ajouts cimentaires hydrauliques sont des matériaux inorganiques ou un mélange de matières inorganiques pouvant développer des résistances par formation des hydrates au cours des réactions chimiques en présence de l'eau. Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux qui finement broyés développent une réaction chimique avec l'hydroxyde de calcium à la température ordinaire en présence d'humidité pour former des composés possédant des propriétés cimentaires [ASTM C125]. Les ajouts cimentaires supplémentaires les plus couramment utilisés dans le béton sont les fumées de silice, le filler, le métakaolin, le laitier et les cendres volantes.

2.1.1 Fumées de silice

Les fumées de silice sont des sous produits de la fabrication de silicium. La taille moyenne de leurs particules est d'environ 0,1 μm . Elles sont de très petites particules qui

peuvent être de 30 à 100 fois plus fines que les grains de ciment Portland. Elles peuvent avoir deux effets dans le système cimentaire où elles sont incorporées : un effet de remplissage et un effet pouzzolanique. Ce dernier effet est obtenu grâce à la structure amorphe, à la très haute teneur en silice et à la grande surface spécifique des fumées de silice. La fumée de silice réagit avec la portlandite produite par l'hydratation des silicates de calcium du ciment Portland pour former un silicate de calcium hydraté. La silice, sous forme de verre (amorphe), est très réactive et la petitesse des particules accélère sa réaction avec la portlandite. Cependant, il a été prouvé que c'est la dimension des grains du filler qui est importante puisque l'on peut remplacer la fumée de silice par du noir de fumée de silice de même diamètre et obtenir des gains de résistance semblables [FRIAS et coll., 2000]. Les particules de fumée de silice comblent ainsi les espaces vides entre les grains de ciment occupés généralement par l'eau. Ce qui améliore le remplissage des vides. De ce fait et en raison de leur surface spécifique élevée, les fumées de silice ont tendance à adsorber beaucoup d'eau, augmentant ainsi la demande en eau.

De plus les particules de fumée de silice peuvent agir comme des sites de nucléation des cristaux de portlandite, favorisant ainsi l'accroissement du taux d'hydratation du ciment et l'amélioration de l'homogénéité et la finesse des produits d'hydratation à travers le processus d'affinement des grains [NEHDI, 1995]. De même Cheng-Yi et Feldman (1985), avaient observé des résultats similaires sur la fumée de silice qui accélère la réaction d'hydratation par la création des sites de nucléation des cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dès les premières minutes après que la réaction ait commencé, densifiant davantage la zone de transition. Les fumées de silice sont très efficaces pour réduire le ressuage et la ségrégation.

L'influence de la fumée de silice sur la pénétrabilité est très importante. Khayat et coll., 1992 ont rapporté qu'une teneur de 5 % de fumée de silice réduit le coefficient de pénétrabilité dans le rapport de 1 à 3. Ainsi, l'influence bénéfique de la fumée de silice est donc plus importante sur la pénétrabilité que sur la résistance à la compression. La réduction de la pénétrabilité entraîne une meilleure résistance à la pénétration des ions chlore. Même en utilisant un ciment Portland d'une teneur en C_3A supérieure à 14 %, la présence de 5 à 10 % de fumée de silice dans le liant ralentit considérablement la pénétration des ions chlore dans le béton [RASHEEDUZZAFAR et coll., 1992, AL-AMOUDI et coll., 1994]. La résistance aux sulfates des bétons contenant de la fumée de silice est également bonne en raison, d'une part

de sa faible pénétrabilité et, d'autre part, de la faible teneur en hydroxyde de calcium et en alumine, qui sont incorporés dans les CSH. Des essais sur mortier ont montrés l'effet bénéfique de la fumée de silice sur la résistance à des solutions de chlorure de magnésium, de sodium et de calcium [FELDMAN et coll., 1985]. Par l'activité pouzzolanique, la fumée de silice est également efficace dans le contrôle de la réaction alcali-silice comme le montre, les travaux de Hasparyk et coll., (2000). Elle améliore également la résistance à l'abrasion, puisqu'elle annule le ressuage et par conséquent, il ne se forme pas de couche superficielle poreuse [KHAYAT et coll., 1992].

2.1.2 Filler

Le mot filler provient de l'anglais «to fill», ce qui signifie «remplir». Les fillers jouent principalement un rôle de remplissage dans la matrice cimentaire dans laquelle ils sont incorporés. Un filler est un matériau non hydraulique, très finement broyé, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a un effet bénéfique sur certaines propriétés du béton, telles que la maniabilité, la masse volumique, la pénétrabilité, la capillarité, le ressuage ou la tendance à la fissuration. Les fillers sont en général chimiquement inertes, même s'ils présentent certaines propriétés hydrauliques [ZIELINSKA, 1972]. Le filler calcaire réduit légèrement la demande en eau du béton, améliore les propriétés rhéologiques de la pâte et du béton frais, et réduit notamment le ressuage et la ségrégation [NEVILLE, 2000]

Les fillers peuvent améliorer l'hydratation du ciment portland en agissant comme des sites de nucléation hétérogène, favorisant la germination de C-S-H [BROOKS et coll., 1990]. Ramachandran, (1984), a trouvé que, outre son rôle de nucléation dans la pâte de ciment hydraté, le filler calcaire s'incorpore partiellement dans la phase C-S-H, ce qui présente un effet bénéfique sur la structure de la pâte de ciment hydraté. Ils contribuent à la densification de la pâte de ciment et peut réduire sa porosité et sa pénétrabilité par l'affinage des pores.

Pinsonneault et Aïtcin (1983) estiment qu'en plus de son rôle principal qui est de densifier la matrice du mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique qui contribuerait à améliorer considérablement les caractéristiques de la zone de transition et du coup augmenter les résistances à la compression par la formation des carboaluminates.

2.1.3 Pouzzolanes naturelles

De toutes les pouzzolanes naturelles, le métakaolin est le matériau le plus utilisé. Il est produit à partir de kaolin, un certain type d'argile de grande pureté, calciné à une température comprise entre 650 et 850 °C. Le produit est broyé jusqu'à une taille moyenne d'environ 1 à 2 µm [KOSMATKA et coll., 2003]. Les travaux de FRIAS et coll., (2000) ont montré que le métakaolin, augmente le degré d'hydratation des particules de ciment, réduit la pénétrabilité du béton par l'affinage des pores puis améliore la zone de transition interfaciale par la consommation de la portlandite pour produire davantage du gel C-S-H. De même POON et coll., 2006 avaient également observé ces mêmes résultats. Les essais conduits par ASBRIDGE, (2002), ont illustré une augmentation de la microdureté de la zone de transition par le métakaolin. Les bétons incorporant le métakaolin présentent une pénétrabilité aux ions chlore plus faible, une meilleure résistance à la réaction alcalis-granulats et aux cycles de gel dégel [Yan et coll., 2007]. Une incorporation de 10 à 15% de métakaolin suivant la réactivité des granulats peut réduire l'expansion due à la RAG dans les limites de 0,04 % après 2 ans recommandées par la norme CSA A23.2-14A [RAMLOCHAN et coll., 2000]. Le métakaolin réduit le retrait de séchage du béton [GUNEYISI et coll., 2008]. Le métakaolin diminue initialement l'hydratation des particules du ciment, mais par suite de sa réaction pouzzolanique, il contribue de plus en plus à la production de la chaleur et du taux d'hydratation [SNELSON et coll., 2008].

2.1.4 Laitier

Le laitier granulé est un résidu de la production de la fonte dans les hauts fourneaux. C'est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium. Il peut être incorporé dans le béton en substitution partielle du ciment. Son incorporation dans le béton peut amener plusieurs effets bénéfiques tels qu'une meilleure maniabilité, un développement plus lent de la chaleur d'hydratation, une microstructure de la pâte de ciment plus dense. Il contribue à améliorer la résistance à long terme et particulièrement la durabilité des bétons. Le risque de la réaction alcalis-silice peut être éliminé, indépendamment de la teneur en alcalis du ciment ou de la réactivité des granulats [IDORN, 1983]. WOOD (1981) explique le phénomène d'amélioration de la

maniabilité par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier plus lisse et absorbant peu d'eau au cours de malaxage, qui permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte. Le laitier diminue la résistance à 24 h, la chaleur d'hydratation, les risques de la réaction alcalis-granulat et augmente le rapport de la résistance en tension sur la résistance à la compression, la résistance aux sulfates et à l'eau de mer [TAGNIT-HAMOU, 2007, BARRETT et coll., 2005, MIURA et coll., 2000, RASHEEDUZZAFAR et coll., 1991]. SHI et coll. (2006), ont observé que le laitier augmente la fluidité du béton et par conséquent réduit la viscosité plastique du béton. Le laitier réduit sensiblement la réaction alcalis granulat [RICHARDSON et coll., 2005]. TUMIDAJSKI (2006) a étudié l'effet des liants et des techniques de finition sur les sorptivités capillaires, sous des conditions d'exposition C-2 définies dans la norme CSA, après un an, des bétons commerciaux, coulés sur place, durcis et finis. Il a constaté que l'ajout de 40 % de laitier granulaire broyé est très efficace pour réduire les sorptivités du béton coulé sur place [TUMIDAJSKI, 2006]. Une étude conduite par GAO et coll. (2008) portant sur la microstructure et la structure des pores du béton contenant du laitier révèle que le laitier incorporé dans le béton réduit la quantité de la portlandite, augmente la quantité du gel C-S-H, réduit les effets néfastes des pores (de plus de 100 nm), rendre la structure plus dense et améliore la microstructure et la durabilité du béton [GAO et coll., 2008].

2.1.5 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des résidus finement divisés résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui en échappent. Elles sont fréquemment utilisées dans le béton. Leur incorporation dans le béton peut réduire le besoin en eau d'environ 5 à 15% par rapport au ciment Portland [CUR, 1991 et HELMUTH, 1987]. Cette réduction en eau est souvent attribuée à la forme sphérique des particules des cendres volantes et aussi à l'adsorption des fines particules de cendres volantes sur les grains de ciment qui favorise leur défloculation. Leur hydratation est lente et nécessite souvent un prolongement de la durée de mûrissement humide pour favoriser le développement de ses performances. Elles contribuent à l'amélioration de la compacité du béton favorisant ainsi le gain de résistance et de durabilité. Compte tenu de leur hydratation lente l'effet des

ces cendres volantes sur les propriétés à l'état durci des bétons est plus important à long terme plus qu'au jeune âge. L'incorporation des cendres volantes dans le béton favorise l'affinage des pores, la réduction de la pénétrabilité à l'eau et aux ions chlorures et l'accroissement de la résistivité électrique [HUSSAIN et coll., 1994]. Les cendres volantes de classe C présentent une meilleure résistance à la carbonatation que celles de classe F [TANGTERMSIRIKUL et coll., 2006]. L'effet des cendres volantes sur la chaleur d'hydratation diffère selon leur taux d'incorporation et le rapport E/L. En effet, Wang et coll. (2006) avaient remarqué que pour des rapports E/L élevés, la chaleur d'hydratation diminue avec l'augmentation du taux de substitution par les cendres volantes. Par contre pour les rapports E/L faibles l'effet est inverse. Toutefois pour des taux de substitution supérieurs à 40 % l'effet est similaire quel que soit le rapport E/L.

2.2 Ajouts cimentaires supplémentaires alternatifs

Les ajouts cimentaires supplémentaires alternatifs sont des constituants inorganiques pouvant développer une activité pouzzolanique ou hydraulique ou les deux, et contribuer au développement de résistance et améliorer d'autres caractéristiques du béton. Ces matériaux ne répondent pas aux définitions des matériaux cimentaires supplémentaires de la norme CSA A3001 [CSA A3004-E1]. Le CAISifrit et le verre font partie de cette catégorie d'ajouts cimentaires.

2.2.1 CAISifrit

La production de 100 tonnes d'aluminium génère environ deux tonnes de brasques usées. Le recyclage et le traitement des brasques par Nova Pb inc., fournissent un matériau amorphe appelé CAISifrit. Le CAISifrit est produit par traitement des brasques usées de l'industrie de l'aluminium. La composition actuelle du CAISifrit permet de remplacer jusqu'à 25 % du ciment dans le béton.

L'utilisation du CAISifrit dans le béton est très récente et demeure encore au stade expérimental. Les premières études expérimentales sur le CAISifrit ont lieu au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. En effet, une étude menée par TAGNIT-HAMOU et coll.

(2004) sur les effets de remplacement partiel du ciment par le CAISifrit dans le mortier et béton a révélé que le CAISifrit présente un potentiel de réactivité remarquable et un comportement rhéologique intéressant. Ils ont également observé que la substitution du ciment par le CAISifrit améliore l'ouvrabilité et les résistances du mortier ou béton. Pour une maniabilité donnée, le béton contenant 25 % du CAISifrit requiert moins de 50 % de réducteur d'eau par rapport au béton témoin. Le développement de résistance à la compression des mélanges de CAISifrit est similaire voire meilleur que le témoin ou à d'autres mélanges incorporant même taux de laitier. Le CAISifrit réduit significativement la pénétrabilité aux ions chlore, l'expansion due à la réaction alcalis-granulats malgré sa forte teneur en alcalis [TAGNIT-HAMOU et coll., 2004]. De même d'autres études conduites par LALDJI et coll. (2006) ayant pour objectifs d'étudier les performances des systèmes cimentaires ternaires et quaternaires incorporant le CAISifrit ont révélé le même comportement du CAISifrit sur la rhéologie, les propriétés mécaniques et la durabilité de ces systèmes également. Le CAISifrit réduit la chaleur d'hydratation dans ces systèmes. Malgré une plus faible résistance initiale des mélanges de bétons ternaires et quaternaires, leurs résistances à 91 jours sont de 1,05 à 1,25 fois celles du témoin; leur pénétrabilité a été réduite d'environ 35 à 17,7% du témoin [LALDJI et coll., 2006]. Suite aux résultats des essais de laboratoire effectués par LALDJI et TAGNIT-HAMOU (2003), des projets pilotes ont été entrepris pour évaluer la performance à long terme et la durabilité des bétons incorporant le CAISifrit. À cet effet trois bétons structuraux incorporant le CAISifrit ont été coulés sur chantier et les essais tels que les résistances à la compression, à la traction par fendage, en flexion, à l'écaillage, le module d'élasticité et le retrait de séchage ont été réalisés conformément à l'échantillonnage et procédures d'essais décrits dans la norme CSA A3004-A1. Les bétons incorporant le CAISifrit présentent des résistances à la compression, à la traction par fendage et en flexion qui sont bien au-delà des valeurs estimées et, dans plusieurs cas, supérieures à celles obtenues dans le béton témoin. La durabilité exprimée par le retrait endogène et de séchage, l'écaillage de la surface et la pénétrabilité aux ions chlore a montré un très bon potentiel de résistance à long terme [LALDJI et coll., 2007b]. La synergie entre le CAISifrit et la fumée de silice sur les propriétés du béton a été bien mise en évidence. En effet, lorsque la fumée de silice est utilisée pour améliorer la résistance au jeune âge (ACI Comité 234 2000), le CAISifrit, avec sa lente réaction pouzzolanique, améliore la résistance à long terme [LALDJI et coll., 2007b].

2.2.2 Verre

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme l'utilisa pour la première fois, il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes et des bijoux. Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie ou d'Égypte. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleurs verte ou bleue. Les fours permettent d'obtenir de plus hautes températures, pour lesquelles la matière est mieux travaillée. Aujourd'hui le verre est produit industriellement pour diverses applications. Il peut servir de contenant comme de bouteilles, pots de yaourt, bécchers, erlenmeyers, éprouvettes, tubes d'essais, etc...

Les bouteilles de verre peuvent être recyclées. Cependant, le recyclage du verre mixte est confronté à des difficultés de tri, menant assez souvent à sa mise en décharge. Une autre nouvelle technique innovante permettant d'exploiter ces verres mis en décharge est leur utilisation dans le béton. L'utilisation de la poudre de verre dans un système cimentaire, est un moyen de valorisation des verres en décharge. C'est une technique récente et les quelques résultats des travaux antérieurs effectués sur le verre, utilisé en poudre comme substitut partiel du ciment sont décrit dans cette partie.

SHAYAN et coll. (2006) ont mené des études sur une dizaine de mélanges de bétons de rapport $E/L=0,49$, dont trois incorporant 0, 20 et 30 % de la poudre de verre en substitution partielle du ciment et désignés respectivement par Mix1, Mix3 et Mix4 retiennent particulièrement notre attention. Les surfaces spécifiques Blaine des matériaux utilisés sont de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ et $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ respectivement pour le ciment et la poudre de verre. Les résultats de l'affaissement exprimés par le tableau 2.1 montrent que la poudre réduit l'ouvrabilité des mélanges. Ceci serait lié à sa surface spécifique très élevée, plus que le double de celle du ciment utilisé. Ces résultats confirment ceux obtenus sur les poudres finement broyées [GALLIAS et coll., 2000, YAMAMOTO et coll., 2007].

TABLEAU 2.1 AFFAISSEMENT DES BÉTONS $E/L = 0,49$ [SHAYAN et coll., 2006]

Mélanges	témoin	20% Poudre de verre	30% Poudre de verre
Affaissement (mm)	70	65	60

TAHA et coll., 2008a ont étudié plusieurs mélanges de béton dont M1 et M4 sont respectivement les mélanges témoin et avec 20 % de poudre de verre en remplacement de ciment. Les bétons ont un rapport E/L=0,38 et un dosage en liant de 440 kg/m³. Le diamètre moyen (d₅₀) des particules de la poudre de verre utilisée est inférieur à 45 µm. Les mélanges M1-1 et M1-2 sont des mélanges dont le liant est uniquement du ciment mais incorporant respectivement 50 % et 100 % de sable de verre recyclé en remplacement de granulats. Quant aux mélanges M4-1 et M4-2, ils contiennent 20 % de poudre de verre en substitution de ciment et respectivement 50 % et 100 % de sable de verre en remplacement de granulats. Les résultats de l'affaissement (figure 2.1) montrent que le mélange avec 20% de poudre (M4) a le même affaissement que le témoin (M1). Ceci pourra signifier que cette poudre a peu d'influence sur l'affaissement. Mais le remplacement partiel ou total des granulats fins par le sable de verre dans le mélange témoin M1, diminue son affaissement. Par contre dans le mélange avec 20% de poudre de verre M4, l'incorporation de 50 % de sable de verre augmente l'affaissement tandis que l'incorporation de 100 % de sable de verre le diminue. Cette tendance est liée à texture dure des particules de sable de verre, qui favorise le ressuage excessif et la ségrégation [TAHA et coll. 2008a].

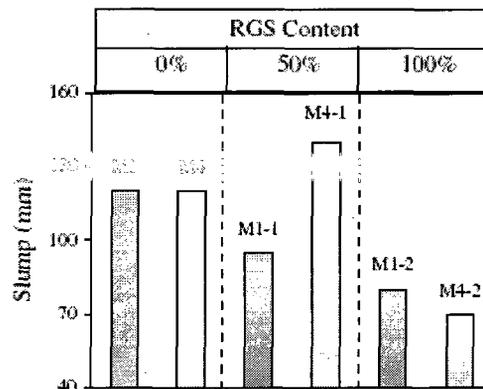


Figure 2.1 Effet de la poudre de verre sur l'affaissement [TAHA et coll., 2008a]

SCHWARZ et coll. (2007) ont trouvé de leur côté une augmentation de l'étalement des pâtes lorsque le taux de substitution par la poudre de verre de finesse Blaine de 262 m²/kg augmente. En effet, ils ont exprimé l'étalement relatif par le rapport des étalements des

mélanges de poudre de verre sur celui du témoin. Les résultats sont donnés sur la figure 2.2. Les travaux de SCHWARZ et coll., 2008b, ont révélé que la poudre de verre augmente l'affaissement du béton et diminue la teneur en air par rapport au témoin pour un rapport E/L = 0,40. En effet, ils ont effectué une comparaison des effets de la poudre de verres broyés et des cendres volantes sur les propriétés des bétons incorporant 10 % de ces ajouts. Les résultats de l'affaissement et de la teneur en air des mélanges sont présentés par le tableau 2.2. Le dosage en adjuvants chimiques (réducteur d'eau ou AEA) est identique pour tous les mélanges.

Tableau 2.2 AFFAISSEMENT ET TENEUR EN AIR DES BÉTONS [SCHWARZ et coll., 2008b]

Mélanges	Témoin	10 % Poudre de verre	10% cendres volantes
Affaissement (mm)	178	215	215
Teneur en air (%)	8	7,5	6,8

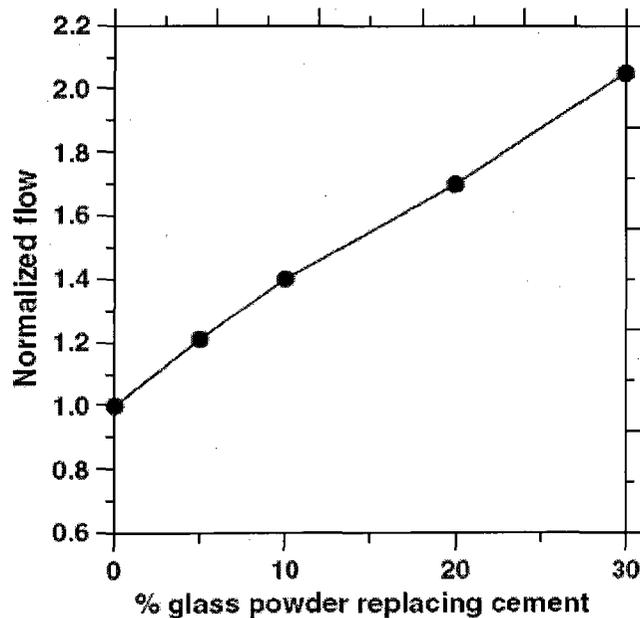


Figure 2.2 Effet de la poudre sur l'étalement relatif des pâtes par rapport au témoin [SCHWARZ et coll., 2007]

Les travaux de SCHWARZ et coll. (2007, 2008a et 2008b) ont montré que la poudre de verre améliore le degré d'hydratation du ciment Portland, diminue la porosité du béton et réduit l'interconnectivité des pores. La poudre de verre améliore l'hydratation des grains de ciment. Cette amélioration est d'autant plus importante que le taux de substitution par la poudre augmente. En effet l'amélioration du degré d'hydratation du ciment par la poudre est due à une augmentation du rapport E/C effectif. Sur la figure 2.3, α_{act} représente le degré d'hydratation des particules actives. Par la figure 2.4, on remarque que la porosité capillaire à 2 jours diminue en fonction du taux de substitution mais augmente à 14 jours. L'augmentation du rapport E/C effectif favorise la dispersion des grains des liants qui occasionne la porosité élevée. Cette porosité élevée est à l'origine des faibles résistances observées dans ces mélanges de poudre de verre au jeune âge.

L'incorporation de la poudre de verre entraîne une réduction de l'interconnectivité des pores plus ou moins proportionnelle au taux de substitution par la poudre [SCHWARZ et coll., 2007]. La réduction de la connectivité des pores est liée à l'augmentation de la tortuosité des pores due à leur remplissage par des produits d'hydratation et aussi par des fines particules de verre non hydratées.

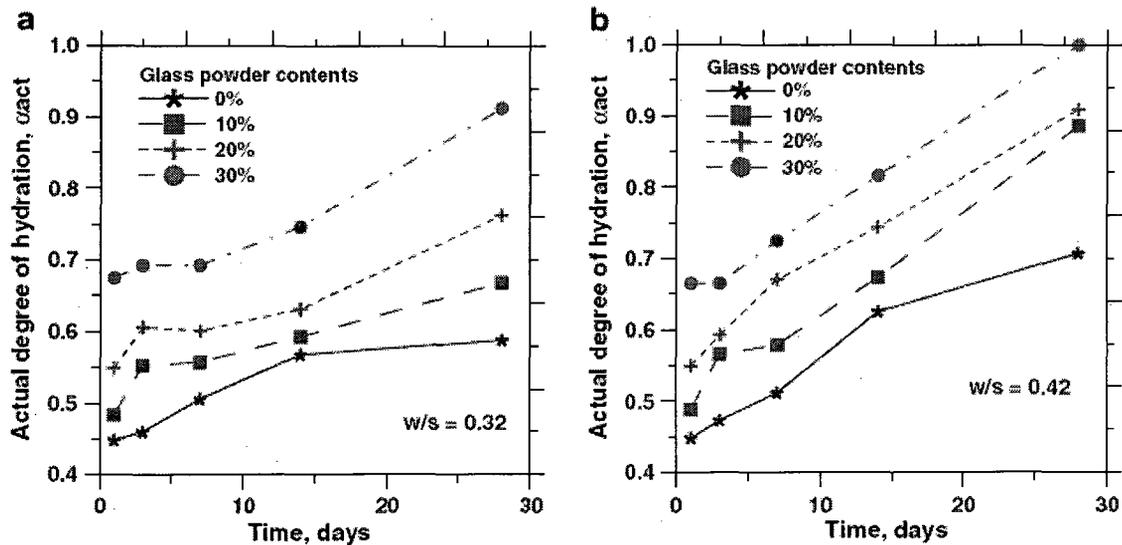


Figure 2.3 Effet de la poudre sur le degré d'hydratation des pâtes [SCHWARZ et coll., 2007]

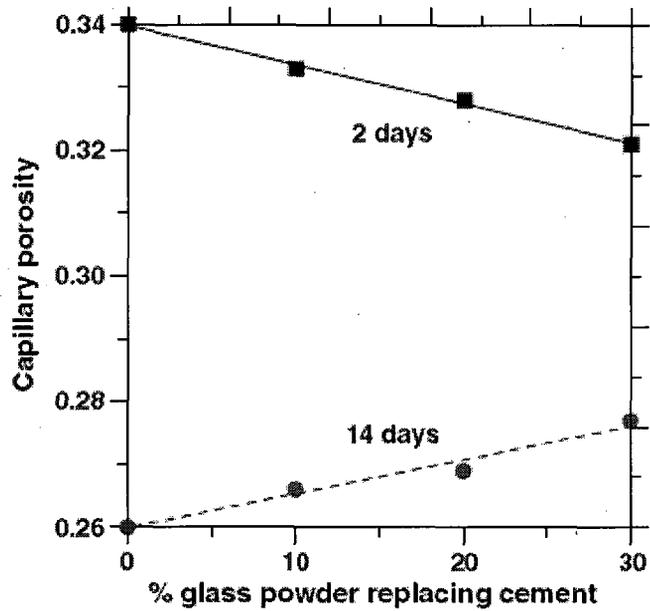


Figure 2.4 Porosité capillaire en fonction du taux de substitution [SCHWARZ et coll., 2007]

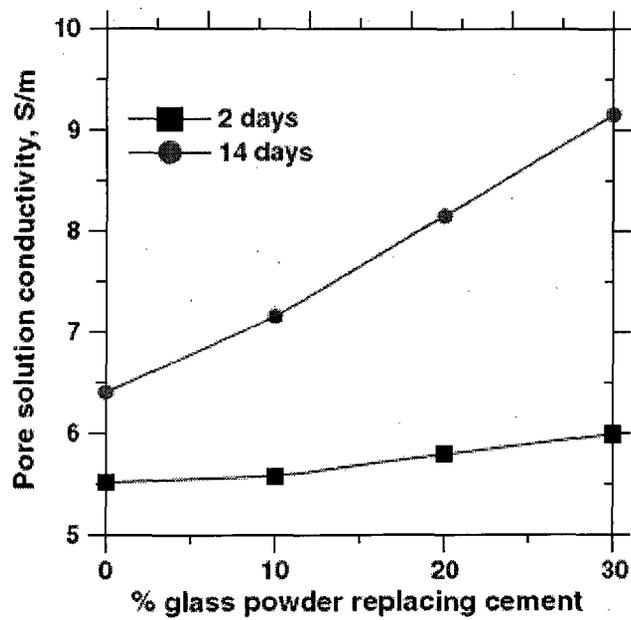


Figure 2.5 Évolution de la conductivité de la solution des pores capillaires en fonction du taux de substitution par la poudre de verre [SCHWARZ et coll., 2007]

SHAYAN et coll. (2004), ont remarqué que la poudre de verre de finesse Blaine de $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ développe des réactions pouzzolaniques importantes dans le mortier et pourrait remplacer jusqu'à 30 % de ciment dans quelques mélanges de béton. Ils ont étudié l'effet de l'incorporation de la poudre de verre par substitution partielle du ciment portland sur les résistances à la compression des cubes de mortiers. Leurs résultats sont illustrés par la figure 2.6. Cette figure montre une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre augmente. Les indices de pouzzolanicité à 28 jours respectifs des mélanges avec 10 %, 20 %, 30 % et 40 % de poudre de verre sont d'environ 92 %, 77 %, 71 % et 58 %.

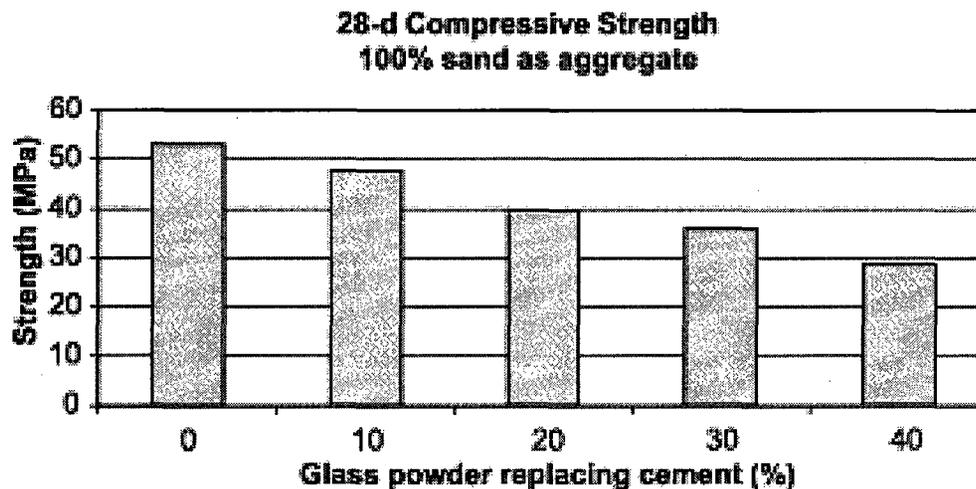


Figure 2.6 Résistance à la compression des mortiers incorporant poudre de verre [SHAYAN et coll., 2004]

D'autres études de SHI et coll. (2005b) ont porté sur des poudres de verre de différentes finesses variant de 264 à $582 \text{ m}^2/\text{kg}$. Les surfaces spécifiques Blaine des poudres de verre GP- dust, GP-4000 et GP-6000 sont respectivement $264 \text{ m}^2/\text{kg}$, $467 \text{ m}^2/\text{kg}$ et $582 \text{ m}^2/\text{kg}$ et celui du ciment est de $383 \text{ m}^2/\text{kg}$. Les résultats montrent que la réaction pouzzolanique est d'autant plus importante que la finesse est élevée. Ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes. Les résultats de résistances à la compression sur les cubes de mortier, illustrés par la figure 2.7, ont indiqué

que la température de murissement a une grande influence sur la poudre de verre que sur les cendres volantes.

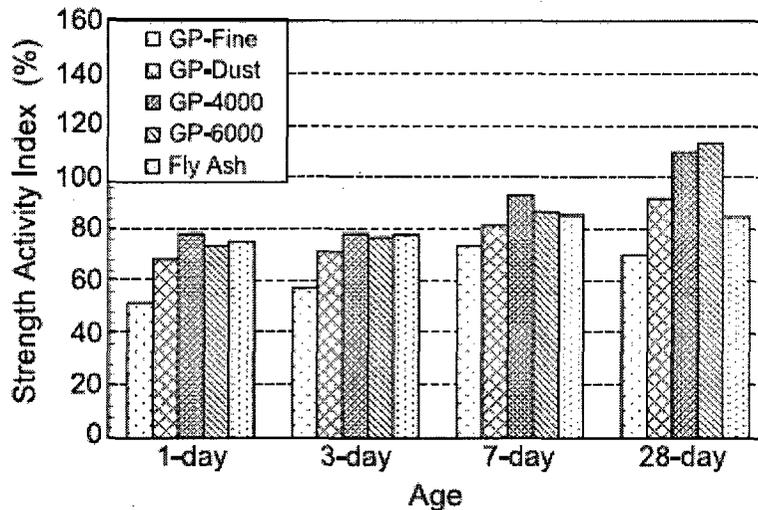


Figure 2.7 Activité pouzzolanique de la poudre de verre [SHI et coll., 2005b]

Les figures 2.8 et 2.9 montrent que les résistances à la compression diminuent lorsque le taux de substitution par la poudre augmente. Ces résistances sont inférieures au témoin à 28 jours mais assez similaires au témoin à 91 jours. La faible résistance à jeune âge pourrait être liée à la faible teneur en ciment qui occasionne une légère augmentation du rapport E/C effectif [SHAYAN et coll. 2004 et 2006]. SHAYAN et coll. (2006) déclarent aussi que le développement de résistance à la compression est lent jusqu'à 28 jours d'âge, mais à l'âge de 404 jours tous les mélanges développent des résistances de 55 MPa en moyenne, dépassant celle du témoin de 40 MPa. Ils ont rapporté à travers les résultats issus de leurs différents mélanges étudiés que la poudre de verre peut être incorporée aux taux de 20 et 30 % en remplacement du ciment dans les bétons de 40 MPa sans effets négatifs sur ses propriétés.

De même, TAHA et coll. (2008) et SCHWARZ et coll. (2007 et 2008b) avaient aussi remarqué de faible résistance à 28 jours dans des mélanges incorporant la poudre de verre. Ces résistances à 28 jours sont d'autant plus faibles que le taux de substitution par la poudre augmente. Des résultats de leurs travaux illustrant l'effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression sont montrés sur les figures 2.10 à 2.12.

Sur la figure 2.9 les mélanges incorporant seulement la poudre de verre en substitution partielle du ciment sont désignés par Mix1, Mix3 et Mix4 avec respectivement 0 %, 20 % et 30 %. Quant à la figure 2.10, M1 est le mélange témoin contenant 100 % de ciment et M4 le mélange contenant 20 % de poudre de verre en remplacement de ciment. Les mélanges de la figure 2.12 sont confectionnés avec deux rapports E/L. En effet, le rapport E/L des mélanges témoin, 10GP, 10FA est de 0,40 tandis qu'il est réduit à 0,36 pour les mélanges 10GPR et 10FAR.

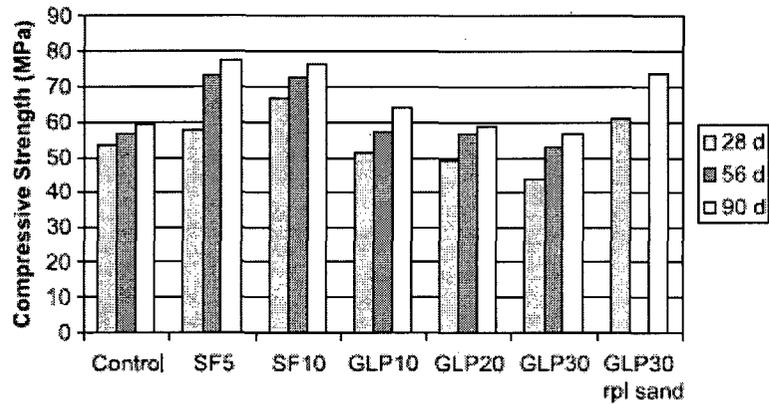


Figure 2.8 Résistance à la compression des mélanges de béton de poudre de verre et fumée de silice comparées au témoin [SHAYAN et coll., 2004]

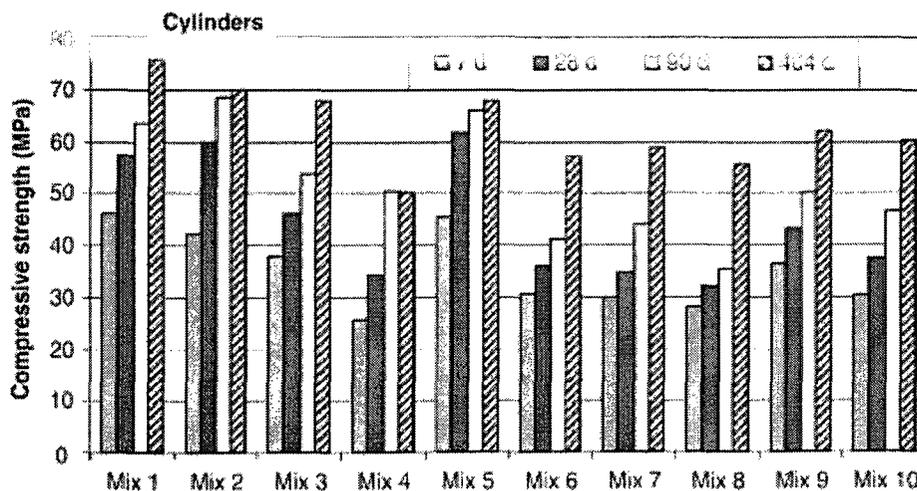


Figure 2.9 Résistance à la compression des bétons étudiés [SHAYAN et coll., 2006]

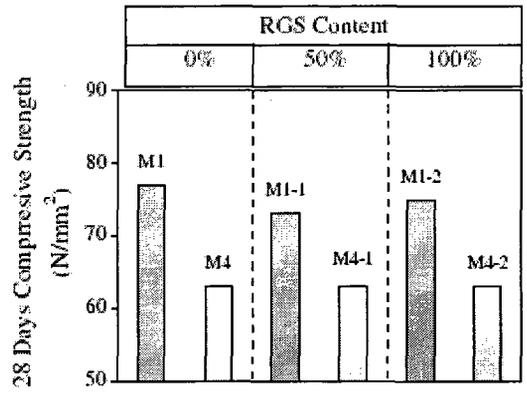


Figure 2.10 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression des bétons à 28 jours [TAHA et coll., 2008a]

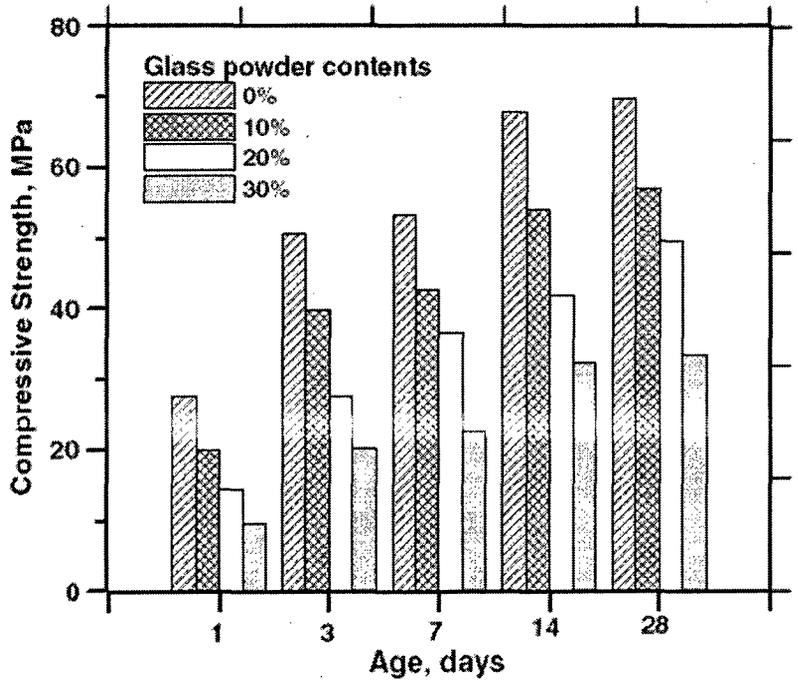


Figure 2.11 Résistance à la compression des bétons E/L=0,42 [SCHARWZ et coll., 2007]

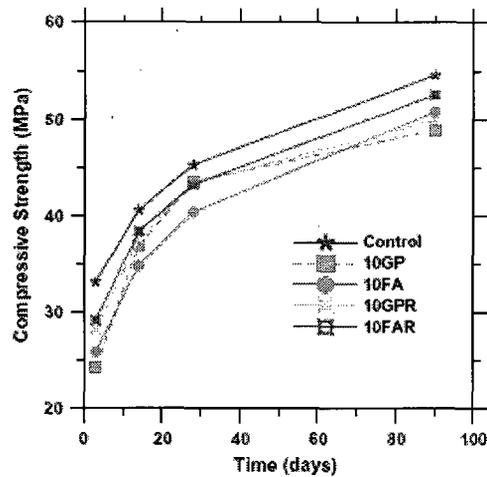


Figure 2.12 Résistance à la compression des bétons incorporant poudre de verre [SCHWARZ, 2008b]

Les résistances en traction et en flexion évaluées par TAHA et coll. (2008a) sur des mélanges incorporant 20 % de poudre de verre sont similaires à celles du témoin. Par contre SHAYAN et coll. (2006) ont observé une légère réduction des résistances en traction et flexion à 130 jours en fonction du taux de substitution par la poudre. Cette différence de tendance observée par ces chercheurs pourrait être liée aux finesses des poudres étudiées et au rapport E/L. Puisque TAHA et coll. (2008a) ont utilisé une poudre de diamètre moyen inférieur à 45 μm dans des mélanges avec $E/L = 0,38$, alors que SHAYAN et coll (2006) ont utilisé une poudre de verre de finesse Blaine 800 m^2/kg dans des mélanges de $E/L = 0,49$.

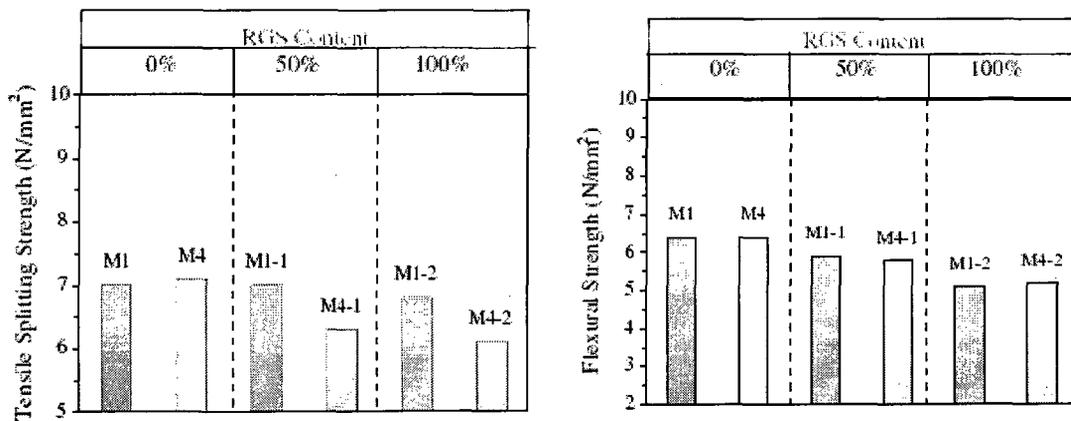


Figure 2.13 Effet de la poudre de verre sur les résistances en traction et en flexion des bétons [TAHA et coll., 2008a]

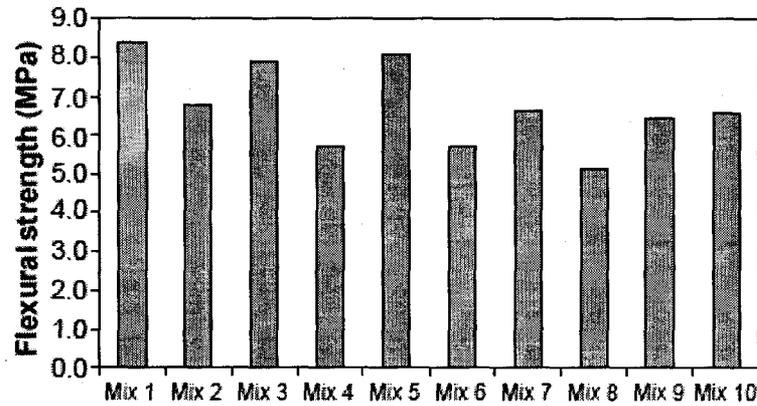


Figure 2.14 Résistance en flexion sur des prismes de bétons à 130 jours [SHAYAN et coll., 2006]

Les modules d'élasticité des mélanges contenant la poudre de verre déterminés par SHAYAN et coll. (2006) diminuent en fonction du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre.

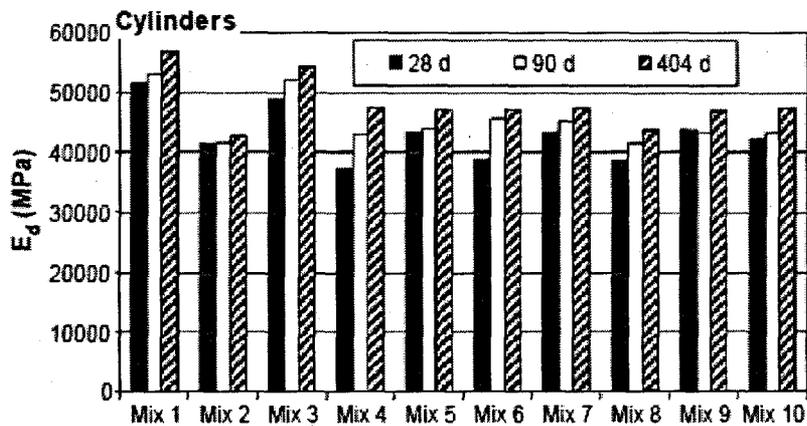


Figure 2.15 Module d'élasticité dynamique sur des cylindres de bétons [SHAYAN et coll. 2006]

La forte teneur en silice du verre laisse prévoir qu'il peut développer d'importante réaction alcali-silice lorsqu'il est utilisé comme substituant partiel des granulats dans le béton. Par contre lorsqu'il est broyé et utilisé comme ajout cimentaire, cette propriété est utilisée à

l'avantage pour développer d'important effet pouzzolanique suite à la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite.

Les résultats des travaux conduits par SHAYAN et coll. (2004) ont montré que le verre utilisé comme granulat fin est susceptible d'être nuisible à la durabilité du béton en favorisant la réaction alcali-silice. Le verre utilisé comme poudre peut ralentir la réaction alcali-silice des granulats de verre comme le montre la figure 2.16 [SHAYAN, et coll., 2004]. D'autres études menées par SHAYAN et coll. (2006), dont les résultats sur la RAG sont présentés par la figure 2.17, montrent également la réduction de l'expansion due à RAG par la poudre de verre.

SHI et coll. (2005a) avaient observé que les bétons légers autoplaçants avec un sable réactif et incorporant la poudre de verre développent une bonne résistance à la réaction alcali-granulat. Les résultats des travaux de SHI et coll. (2005b), illustrés par la figure 2.18, montrent aussi une réduction de l'expansion due à la réaction alcali-granulat dans les mélanges incorporant la poudre de verre, bien qu'il ne soit pas aussi efficace que celle des cendres volantes de même taux de remplacement.

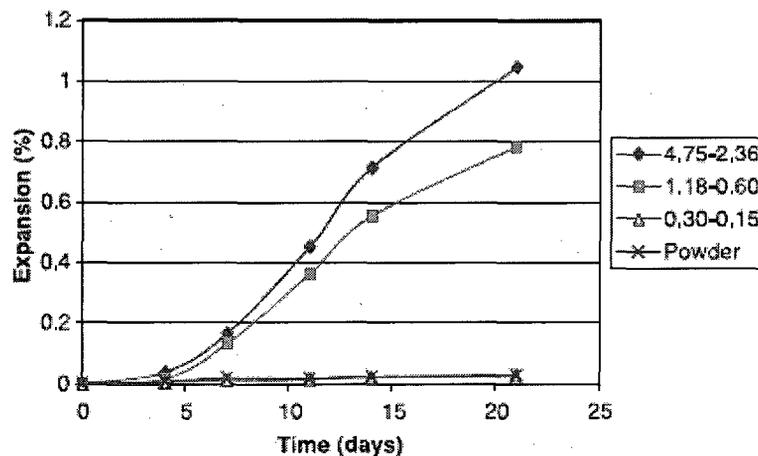


Figure 2.16 Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [SHAYAN et coll., 2004]

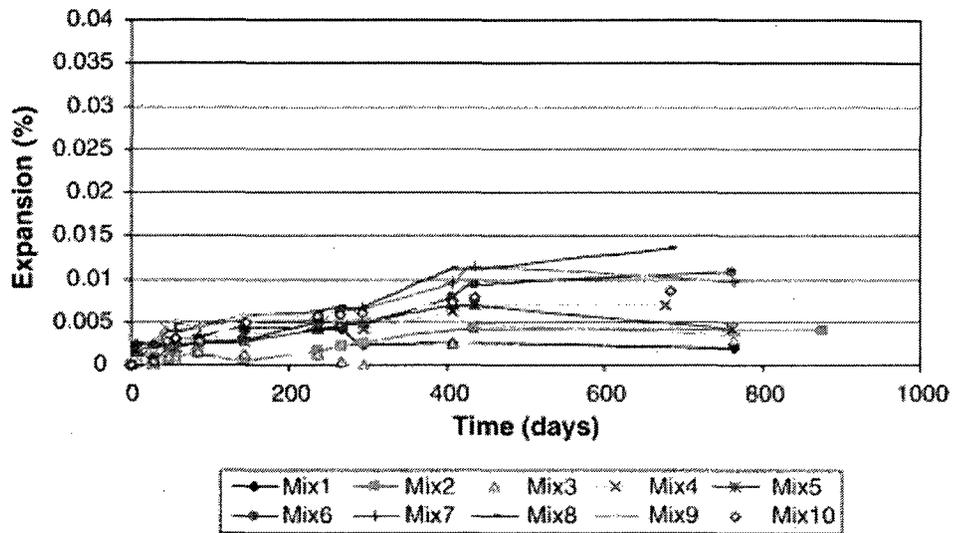


Figure 2.17 Résistance à la réaction alcalis-granulat des bétons, 38 °C et 100 % HR [SHAYAN et coll., 2006]

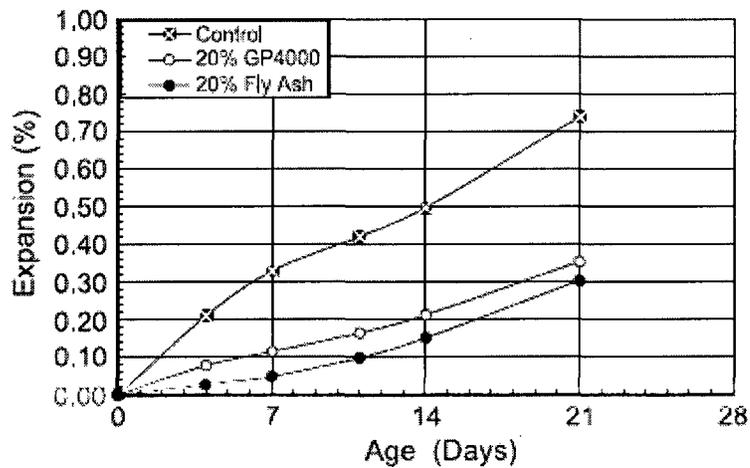


Figure 2.18 Expansion due à la RAG à 23 °C [SHI et coll., 2005b]

D'autres essais menés par SHI et coll. (2005a) sur des bétons légers autoplaçants incorporant la poudre de verre montrent qu'ils développent une bonne résistance au gel et dégel. De même les travaux de TURGUT (2008), dont les résultats sont illustrés par la figure 2.19, montrent que la poudre améliore la résistance au gel-dégel. La figure 2.19 illustre la réduction de la perte de masse par la poudre de verre durant les cycles de gel-dégel. On

remarque que la réduction de la perte de masse augmente avec le taux de substitution par la poudre qui est de 0, 10, 20 et 30%.

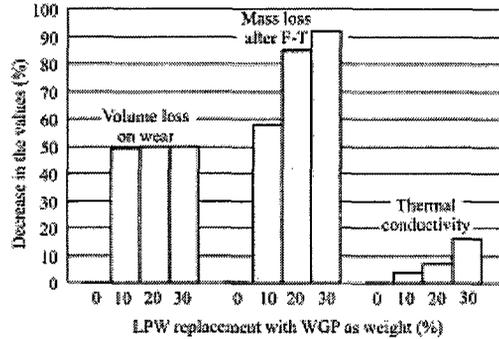


Figure 2.19 Amélioration de la résistance au gel-dégel par la poudre de verre [TURGUT, 2008]

De plus la poudre de verre réduit significativement la pénétrabilité aux ions chlore. Elle contribue par conséquent à l'amélioration de la durabilité des bétons. Les mélanges incorporant la poudre de verre ont une bonne résistance à la pénétrabilité aux ions chlore, réduisant ainsi les risques de corrosion d'armatures du béton. Ces résultats sont observés par SHAYAN et coll. (2006) comme l'indique la figure 2.20, et par SCHWARZ et coll. (2008b), illustré par la figure 2.21. Le mélange contenant de la poudre de verre est identifiée 10 GP sur cette figure.

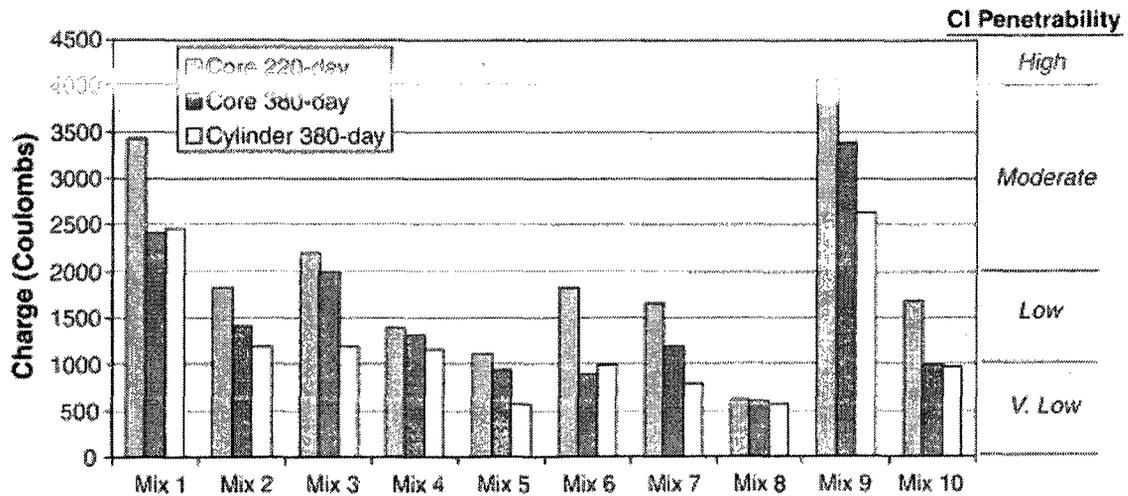


Figure 2.20 Pénétrabilité des ions chlorures [SHAYAN et coll., 2006]

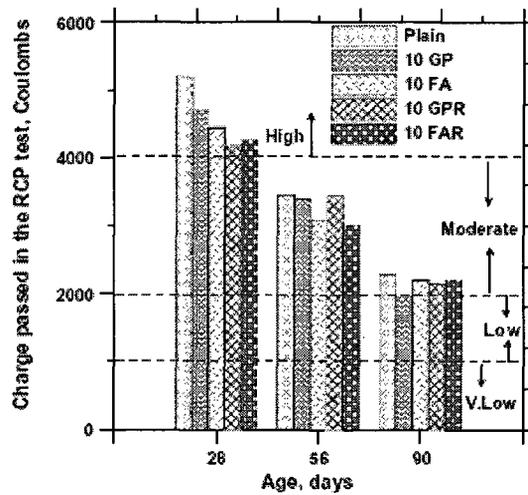


Figure 2.21 Pénétrabilité des ions chlorures [SCHWARZ, 2008b]

Le retrait de séchage du mélange avec 20 % de poudre de verre (Mix3) est du même ordre de grandeur ou légèrement inférieur à celui du témoin (Mix1), figure 2.22. Par contre le mélange avec 30 % de poudre de verre (Mix4) présente un retrait supérieur à celui du témoin. Ces mélanges présentent de retraits au séchage satisfaisants selon la norme Australienne AS 3600 qui limite le retrait de séchage des bétons à 0,075 % à 56 jours [SHAYAN et coll., 2006].

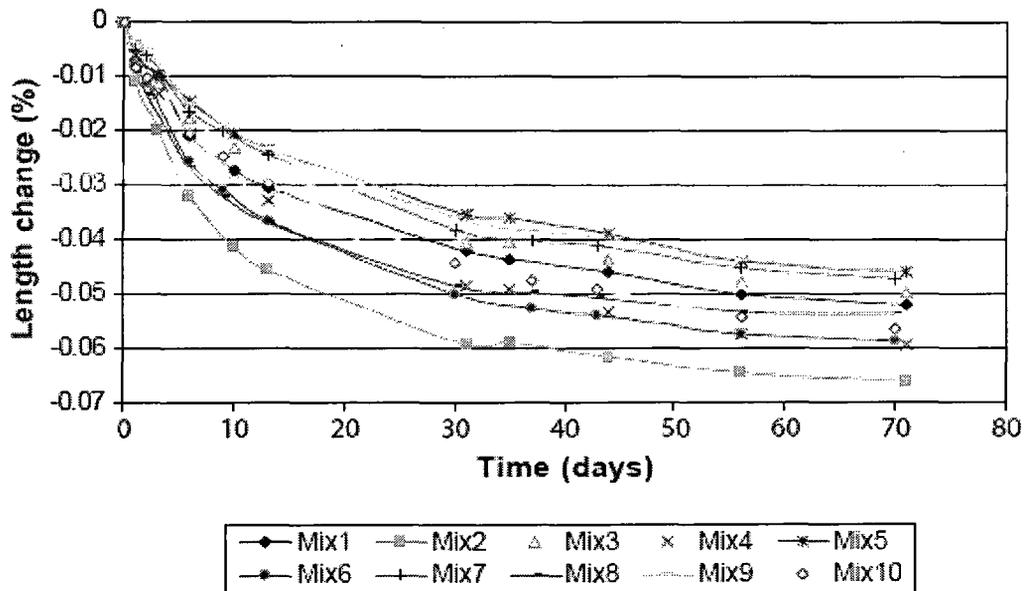


Figure 2.22 Retrait de séchage sur des prismes de bétons [SHAYAN et coll., 2006]

Chapitre 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS

3.1 Introduction

Ce projet porte sur l'étude de l'optimisation de la finesse et du taux d'incorporation de la poudre de verre et son effet sur les propriétés des différents types de béton. Les poudres utilisées sont désignées par 6×25, 9×25 et P7. La poudre (6×25) et la poussière (P7) ont une finesse légèrement inférieure à la finesse du ciment tandis que la poudre (9×25) a une finesse légèrement supérieure à celle du ciment. Les principaux axes de notre étude sont constitués de la caractérisation des matériaux plus précisément les poudres, l'évaluation de leurs effets et performance dans les coulis et mortier d'une part puis dans trois grandes catégories de bétons notamment bétons conventionnels, bétons à haute performance et bétons autoplaçants d'autre part.

3.2 Plan expérimental

Cette section présente une récapitulation des trois différentes phases de notre étude. La phase I concerne la caractérisation des matériaux, la phase II porte sur les essais sur coulis et mortiers et la phase III traite des essais sur les trois catégories de bétons étudiés. Le tableau 3.1 récapitule les phases avec les différents essais effectués et les normes correspondantes utilisées. Les essais effectués à chaque phase sont décrits dans les sections suivantes.

TABLEAU 3.1 RÉCAPITULATION DES ESSAIS EFFECTUÉS

Phases	Essais		Normes	
Caractérisation des matériaux	Physiques	Densité	ASTM C188	
		Finesse Blaine	ASTM C204	
		Granulométrie	-	
	Chimiques	Analyse chimique	ASTM C114	
	Minéralogiques	Microscopie électronique à balayage (MEB)	-	
Diffraction des rayons X (DRX)		-		
Essais sur coulis et mortiers	Coulis	Mini-slump	-	
		Cône Marsh	-	
	Mortiers	Activité pouzzolanique	ASTM C311	
		Réaction alcalis granulat	CSA A23.2-25A	
Essais sur bétons	État frais	Affaissement	ASTM C143	
		Densité	ASTM C138	
		Teneur en air	ASTM C231	
		Température	ASTM C1064	
		Temps de prise	ASTM C403	
		Étalement	ASTM C1611	
		J-Ring	ASTM C1621	
		Capacité de remplissage	-	
		V-Funnel	-	
		L-Box	-	
		Colonne de ségrégation	ASTM C1616	
		Seuil de cisaillement	-	
		Viscosité plastique	-	
	État durci	Propriétés mécaniques	Résistance à la compression	ASTM C39
			Résistance en traction par fendage	ASTM C496
			Résistance en flexion	ASTM C78
			Module d'élasticité	ASTM C469
		Durabilité	Réaction alcalis-granulat	CSA A23.2-14A
			Résistance au gel dégel	ASTM C666
			Résistance à l'écaillage	BNQ 2621-900
	Réseau d'air (L bar)	ASTM C457		
	Pénétrabilité aux ions chlore	ASTM C1202		
	Retrait de séchage	ASTM C157		

3.3 Matériaux utilisés

3.3.1 Ciment

Le ciment utilisé pour les essais est le ciment de type GU de la compagnie Ciment Saint-Laurent. C'est un ciment à usage général couramment employé dans les essais de laboratoire.

3.3.2 Poussière de verre (P7)

C'est une poussière provenant du collecteur de poussières de l'usine de concassage du verre de la compagnie UNICAL. Contrairement aux autres poussières étudiées par LALDJI et coll., (2006) qui sont générées lors de concassage de verre de bouteilles, cette poussière est générée par le concassage du verre plat de construction. Elle est reçue de l'usine pour le compte de ce projet le 7 septembre 2007. Elle est tamisée sur un tamis de 5 mm pour être débarrassée de tout débris et déchets de papiers ou plastique avant d'être utilisée dans les systèmes cimentaires.

3.3.3 Poudre de verres broyés

Les poudres de verre sont obtenues par broyage des granulats de verre triés et séchés au laboratoire. Le tri est effectué manuellement et consiste à étaler une quantité des granulats de verre concassés sur une table puis les débarrasser des impuretés ou déchets de papier et plastique. Le verre trié est mis dans une étuve à 100°C, pour le sécher afin d'éliminer l'humidité avant de le broyer. Le broyage est effectué au moyen d'un petit broyeur à boulets de capacité nominale de 20 kg. Deux poudres de verres broyés 6×25 et 9×25 ont été utilisées dans cette étude. La nomenclature 6×25 ou 9×25 désigne des séquences de broyage qui correspondent à une finesse donnée de la poudre. La séquence de broyage 6 ou 9 x 25 désigne la durée du broyage et correspond à 6 ou 9 x 25 minutes. Il s'agit explicitement d'une masse de 20 kg de verre broyée pendant une durée de 25 minutes et répété jusqu'à 6 ou 9 fois. La répétition s'effectue dans un intervalle de temps régulier d'au moins 45 min pour favoriser le

repos du broyeur (refroidissement) afin de limiter les risques d'agglomération et de colmatage de la poudre sur les corps broyant et sur les parois du broyeur. Cette durée du broyage est fonction de la finesse désirée et permet ainsi d'évaluer l'énergie de broyage correspondante à une finesse obtenue. La transformation de 20 kg de granulats de verre en poudre de 6×25 ou 9×25, nécessite une durée totale minimale respective de 375 minutes soit 6 heures 15 minutes dont 150 minutes de temps de broyage effectif et 225 minutes de repos, ou de 585 minutes soit 9 heures 45 minutes dont 225 minutes de temps de broyage effectif et 360 minutes de repos.

3.3.4 Adjuvants chimiques

Les adjuvants chimiques retenus pour nos essais sur les bétons conventionnels et à haute performance sont le superplastifiant Disal de type polynaphtalène (un réducteur d'eau à haute efficacité) et un agent entraîneur d'air, Airex-L, qui est un composé de sels sulfonés d'hydrocarbures sans chlorure. Le superplastifiant satisfait aux exigences de la norme ASTM C 1070, et est ajouté au béton à faible rapport E/L pour obtenir des bétons fluidifiés (affaissement élevé). Il a une densité de 1,21 et une teneur en extrait sec ou proportion en particules solides de 42 %. L'agent entraîneur d'air est utilisé pour entraîner un réseau de bulles d'air uniformément réparti dans la matrice cimentaire et améliorer la résistance du béton à l'écaillage et au gel et dégel.

Les adjuvants chimiques utilisés pour les bétons autoplacants sont le superplastifiant Glénium 3030 NS et l'agent colloïdal Rheomac VMA 362. Le superplastifiant Glenium 3030 NS est un polycarboxylate ayant une densité de 1,047 et une teneur en extrait sec ou particules solides de 20,3 % dont le dosage est ajusté pour obtenir l'étalement désiré de 650 ± 30 mm. L'adjuvant modificateur de viscosité Rheomac VMA 362 est un additif liquide prêt à utiliser, spécialement conçu pour produire un béton à viscosité accrue et à propriétés rhéologiques contrôlées. Les bétons contenant l'additif Rheomac VMA 362 démontrent une stabilité supérieure, laquelle améliore la résistance à la ségrégation et facilite la mise en place et la consolidation.

3.3.5 Sable d'Ottawa

Le sable d'Ottawa est un sable normalisé suivant la norme ASTM C 778, que nous avons utilisé pour l'essai de pouzzolanité du verre.

3.3.6 Granulats fins

Le sable proposé est un sable naturel fourni par une compagnie locale. Il s'agit d'un sable siliceux ayant un coefficient d'absorption d'environ 1,39 %. Sa densité à l'état saturé et sec en surface (SSS) est de 2,69 et son module de finesse est de 2,4.

3.3.7 Gros granulats

Les gros granulats disponibles sont des granulats concassés provenant de la compagnie Marbleton. Il s'agit d'une roche calcaire métamorphique de densité à l'état saturé et sec en surface (SSS) de 2,74. Son absorption est de 0,40 %. Les gros granulats prévus pour cette étude ont un diamètre nominal maximal de 14 mm pour les bétons autoplaçants et de 20 mm pour les bétons conventionnels et les bétons à haute performance.

3.3.8 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est une eau potable de robinet exempte de toute impureté pouvant compromettre les propriétés du béton.

3.4 Essais de caractérisation des matériaux

La caractérisation des matériaux fait l'objet de la phase I de notre étude. Elle consiste à la détermination des principales caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des matériaux.

3.4.1 Caractéristiques physiques des matériaux

Les caractéristiques physiques déterminées sont la densité, la finesse et la granulométrie.

a- Densité du ciment et des poudres de verre

La densité des poudres sont évaluées à l'aide d'un pycnomètre, figure 3.1. La mesure est basée sur le principe d'Archimède. Le principe consiste à déterminer le volume V_p d'un échantillon de la poudre dont la masse est connue et obtenir par la suite sa densité à partir du rapport entre sa masse et son volume. La détermination du volume V_p de la poudre est basée sur la mesure de la variation de pression d'azote qui occupe deux volumes V_r et $(V_r+V_c-V_p)$, en appliquant la relation suivante :

$$V_p = V_c - V_r \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad 3.1$$

Où (V_c le volume de la cellule ; V_r le volume de référence ; P_1 la pression lue pour V_r ; P_2 la pression lue pour $V_r + V_c - V_p$).

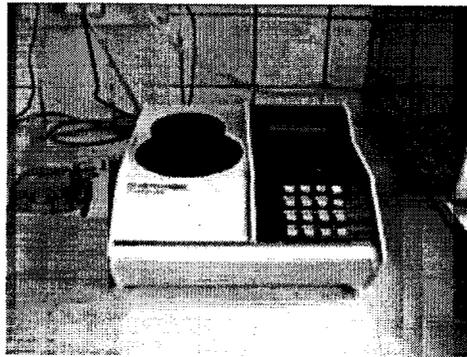


Figure 3.1 Image d'un pycnomètre à hélium [JONQUIERES, 2007]

b- Densité des granulats

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. La

masse volumique des granulats est déterminée sur des sables ou graviers à l'état saturé superficiellement sec (SSS) et est appelée d_{sss} . Elle est effectuée suivant la méthode de l'éprouvette graduée. Cette méthode est très simple et très rapide. Elle consiste à :

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
2. Peser une masse M d'un échantillon sec de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique est alors:

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad 3.2$$

c- Finesse Blaine du ciment et des poudres de verre

La finesse Blaine est couramment utilisée dans l'industrie cimentière pour quantifier la finesse des ciments produits. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre. Elle est évaluée à l'aide d'un perméabilimètre de Blaine. Le principe de fonctionnement illustré par la figure 3.2, consiste à mesurer la durée nécessaire au passage d'un volume d'air à travers l'échantillon de la poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface massique.

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}} \quad 3.3$$

Où:

S = surface spécifique de l'échantillon d'essai, m^2/kg ,

S_s = surface spécifique de l'échantillon standard utilisé dans étalonnage de l'appareil, m^2/kg ,

T = intervalle de temps mesuré en (s), pour la chute du liquide manométrique pour l'échantillon d'essai,

T = intervalle de temps mesuré en (s), pour la chute du liquide manométrique pour l'échantillon standard utilisé dans l'étalonnage de l'appareil,

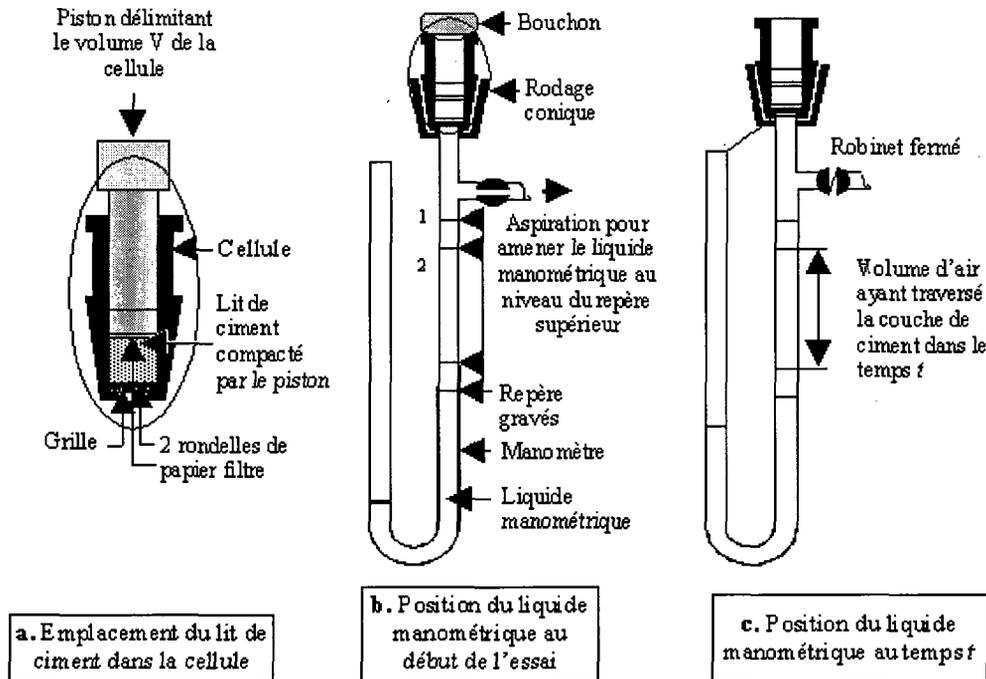


Figure 3.2 Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine [PHOUMMAVONG, s.d.]

d- Granulométrie du ciment et des poudres de verre

La granulométrie est l'étude de la répartition des particules selon leur taille. Pour des poudres fines, on peut utiliser un granulomètre au laser. La poudre est convoyée par de l'eau ou par l'air dans un faisceau laser. Le laser diffracte sur les particules et la largeur de la tache d'Airy permet de déterminer la taille des grains. C'est une technique basée sur la diffraction de la lumière. Lorsqu'un faisceau laser éclaire une particule, on peut observer des franges de diffraction. Selon Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont

fonction de la taille des particules. Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand.

e- Granulométrie des granulats

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les granulats. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers. La méthode de détermination de la granulométrie la plus simple est obtenue par passage au travers d'une série de tamis de mailles décroissantes. Pour les éléments les plus fins ou fillers (moins de 80 μm), on procède par la sédimentométrie.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis au moyen d'une tamiseuse électrique. On appelle tamisât le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis. Après la vibration, les refus sur chaque tamis est pesé du haut vers le bas de la colonne des tamis. Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisâts cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

3.4.2 Caractéristiques chimiques du ciment et des poudres de verre

L'analyse chimique à l'aide de fluorescence X (XRF) a été utilisée pour déterminer les proportions respectives des principaux oxydes présents dans le ciment et les poudres de verre. La spectrométrie de fluorescence X (FX, ou XRF pour X-ray fluorescence) dont le principe de fonctionnement montré à la partie A de la figure 3.3, est une technique permettant l'analyse élémentaire, mais on ne sait pas sous quelle forme chimique. Cette technique utilise des

phénomènes physiques qui ont été découverts et développés dans le domaine de la physique quantique (effet photoélectrique, émission spontanée, diffraction des rayons X). C'est une technique permettant de mesurer des échantillons très variés : minéraux, métaux, huiles, eau, ciments, polymères, verres...

Globalement, on place l'échantillon à analyser sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet des rayons X, l'échantillon «entre en résonance» et réémet lui-même des rayons X qui lui sont propres : c'est la fluorescence. Si l'on regarde le spectre en énergie des rayons X fluorescents, exemple de la figure 3.3 partie B, on voit des pics caractéristiques des éléments présents, on sait donc quels éléments on a, et la hauteur des pics permet de déterminer en quelle quantité.

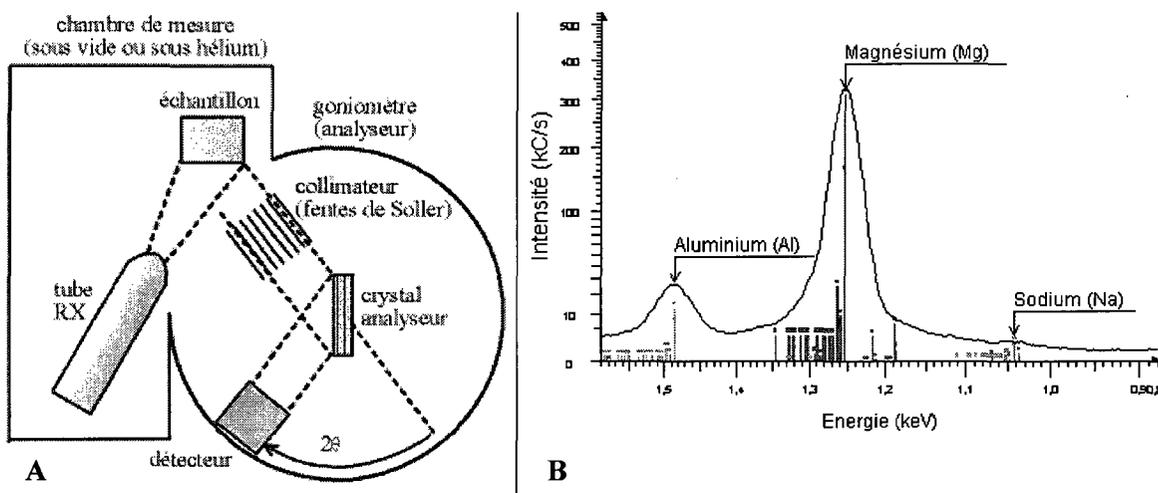


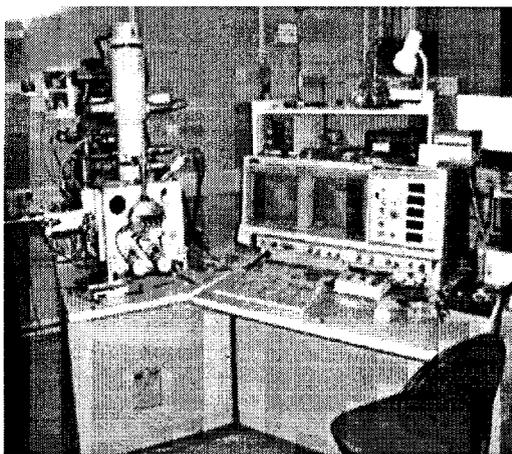
Figure 3.3 Schéma de principe d'un appareil de fluorescence X dispersif en longueurs d'onde (A) et un exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon [EBERHART, 1997, MARTIN et GEORGE, 1998]

3.4.3 Caractéristiques minéralogiques du ciment et des poudres de verre

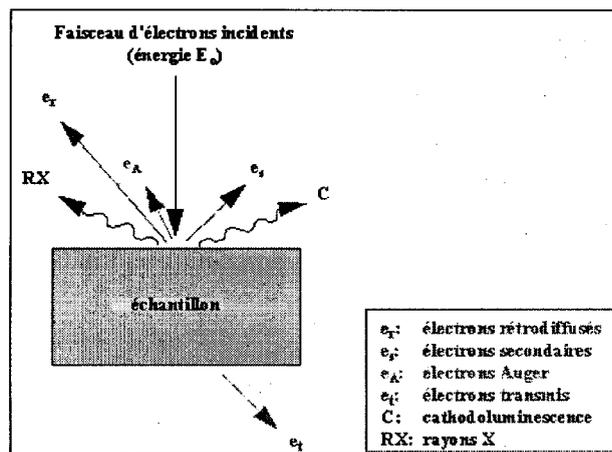
Les caractéristiques minéralogiques du ciment et des poudres de verre sont déterminées à l'aide de microscopie électronique à balayage (MEB) et de la diffraction aux rayons X (DRX).

a- Microscopie électronique à balayage (MEB)

Grâce à la microscopie électronique à balayage (MEB), on peut examiner la morphologie de l'échantillon à des agrandissements pouvant atteindre 300 000 fois. On peut de plus obtenir un spectre dans lequel l'intensité des pics est fonction de la concentration de l'élément caractéristique dans l'échantillon. Les microscopes à balayage, figure 3.4 partie A, sont des microscopes dont l'image est obtenue point par point (6 à 10 nm). Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Les microscopes à balayage utilisent un faisceau très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon, placé dans la chambre du microscope et reçoit un flux d'électrons très important (bombardement), sous l'impact de ce flux d'électrons accélérés, des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires émis par l'échantillon, figure 3.4 partie B, sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec le balayage de l'objet. L'appareil disponible au laboratoire est un MEB à pression variable de marque HITACHI S-3400N et assisté par INCAx-Sight qui effectue l'analyse élémentaire.



A



B

Figure 3.4 Une microscopie électronique à balayage (A) et interaction entre un faisceau et la surface de l'échantillon (B) [DUVAL et coll., s.d.]

b- Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est effectuée suivant la méthode des poudres ou de Debye-Scherrer, figure 3.5 partie A. C'est la méthode la plus utilisée lorsque le matériau est une poudre fine. Elle consiste à faire tomber un faisceau de rayons X monochromatique sur la poudre microcristalline disposée sur une petite baguette de verre, dans un petit capillaire ou encore étalée sur une lame mince spéciale. L'hypothèse de base est que parmi tous les petits cristaux présents (en principe non orientés) il s'en trouvera suffisamment pour présenter des faces cristallines telles que des diffractions pourront se faire selon l'angle 2θ de Bragg.

Selon les appareils, on enregistrera donc les rayons diffractés sur un film photographique avec une chambre cylindrique ou soit on obtiendra un diffractogramme par l'intermédiaire d'un compteur de rayons X qui détectera les rayons diffractés et leur différente intensité. Sur le diffractogramme, on obtient une succession de « pics » correspondant à des angles précis : chacun de ces pics correspond à une distance réticulaire, montrée par la figure 3.5 partie B. L'appareil utilisé pour cet essai dans cette étude est un diffractomètre X'pert Pro MRD de Panalytical.

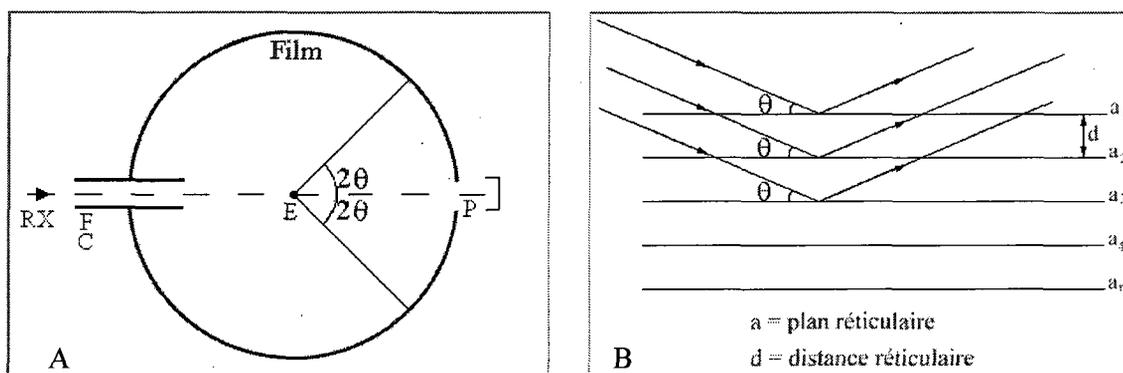


Figure 3.5 Principe de la chambre de Debye-Scherrer (A) et principe de la loi de Wulff-Bragg (B) [PHILIPPON, s.d.]

F, C = fente, collimateur du rayonnement X

E = place de l'échantillon

P = Puits d'absorption des rayons X.

3.5 Essais sur pâtes et mortiers

La phase II de cette étude traite les essais effectués sur les coulis et sur les mortiers.

3.5.1 Essais sur pâtes

Les essais effectués sur pâte sont le mini-affaissement ou “Mini-slump” et le Cône Marsh.

a- Mini-slump

L’essai Mini-slump est un essai généralement utilisé pour évaluer l’évolution de la maniabilité du coulis, en fonction du temps, afin de prédire le comportement du coulis durant l’injection. L’essai est effectué au moyen d’un mini cône d’affaissement ayant un diamètre supérieur de 19 mm, un diamètre inférieur de 38 mm et une hauteur de 57 mm. Les dimensions de ce mini cône sont proportionnelles à celles du cône d’Abrams utilisé pour le béton (norme ASTM C143). Cet essai s’apparente à celui de l’affaissement du béton et est adapté au matériau qu’est le coulis. La préparation du coulis se fait de la façon suivante :

- Peser l’eau ayant une température de 5 °C dans le bécher de 500 ml;
- Incorporer le liant dans l’eau en démarrant le chronomètre;
- Mélanger manuellement avec une spatule de métal jusqu’à une minute;
- Poursuivre le mélange mécaniquement avec une mixette jusqu’à 3 minutes;
- Couvrir le bécher avec un verre de montre jusqu’à l’essai de Mini-slump.

La figure 3.6 présente des différentes vues du mini-cône ainsi que la procédure de l’essai Mini-slump qui consiste à verser le coulis dans un mini-cône, placé au préalable sur une plaque de plexiglas bien mise au niveau. Afin d’homogénéiser, 10 coups de spatule sont donnés sur le cône et l’excès de coulis est arasé à l’aide d’une règle. Le cône est ensuite soulevé verticalement sans vibration et deux diamètres perpendiculaires sont mesurés une fois que le coulis s’est étalé. La moyenne de ces deux lectures est reportée en fonction du temps. Les mesures d’étalement du coulis sont effectuées à 10, 30, 40, 60, 90 et 120 minutes du contact eau-liant.

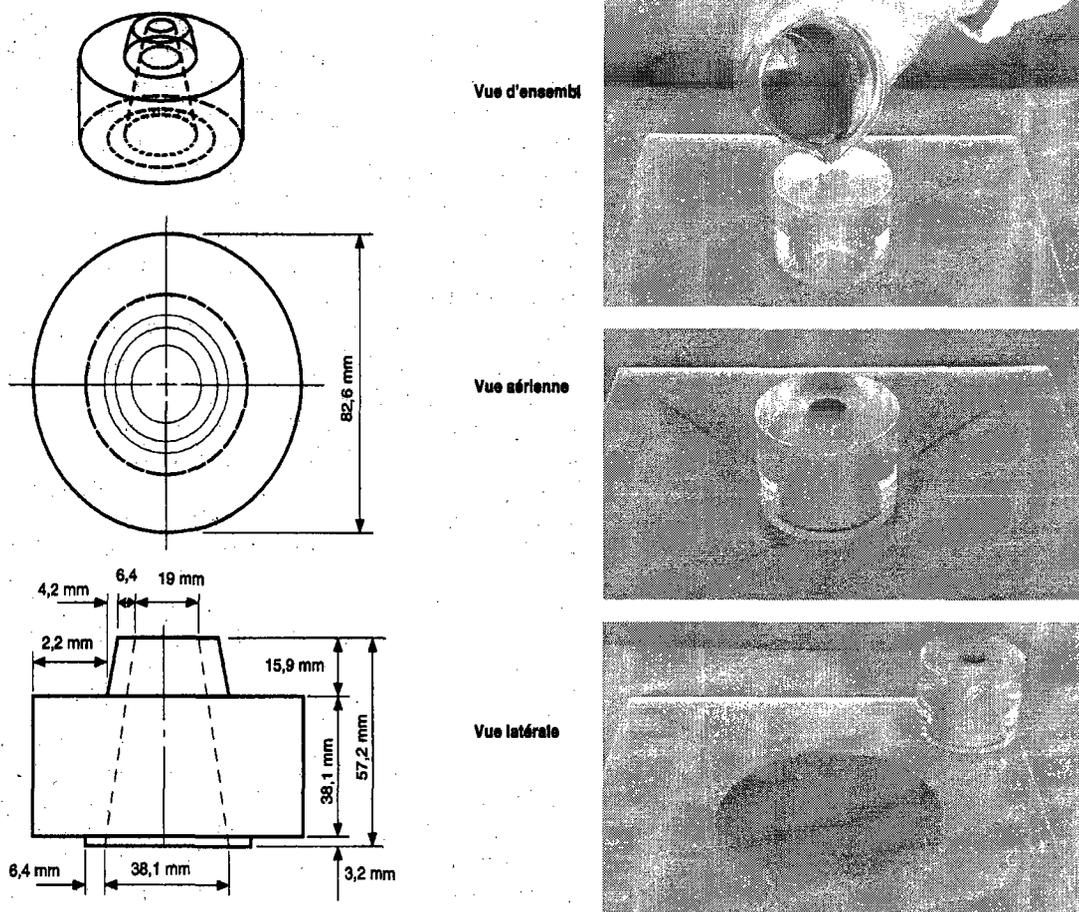


Figure 3.6 Essai Mini-slump [Tiré du Laboratoire du cours GCI 712 Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, 2007]

b- Cône Marsh

L'essai de Cône Marsh est effectué sur des coulis ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 de façon à déterminer leur comportement en présence de superplastifiant. La procédure de malaxage est la suivante :

- Peser l'eau et le superplastifiant dans le récipient du mélangeur électrique;
- Introduire le liant pendant le malaxage sur une période de une minute et demie;
- Poursuivre le malaxage pendant 30 secondes;

- Arrêter le malaxage pendant 15 secondes pour racler les côtés du récipient;
- Enfin malaxer encore pendant 45 secondes.

La température de l'eau de malaxage est ajustée aux alentours de 5°C de façon à limiter la température du coulis à moins de 25°C et ainsi prévenir son échauffement excessif pendant la durée de l'essai. L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement des premiers 700 ml d'un échantillon total de 1200 ml à travers le cône Marsh, figure 3.7. L'écoulement dans le cône dépend de la viscosité du coulis, des forces de frottement sur les parois du cône (qui doit être toujours propre), et de la hauteur du coulis dans le cône. L'expérience acquise au laboratoire de l'Université de Sherbrooke a démontré que l'écoulement était linéaire jusqu'à environ 700 ml. Ce temps d'écoulement servira à comparer les écoulements à travers le cône Marsh et ainsi déterminer l'optimum du dosage en superplastifiant pour un liant donné, ou son point de saturation défini comme le dosage au-delà duquel il n'y a aucun gain de fluidité. Le point de saturation sera déterminé à 5 minutes puis à 60 minutes de façon à étudier l'évolution de la rhéologie du coulis durant une période qui correspond en gros au temps de livraison d'un béton sur un chantier.

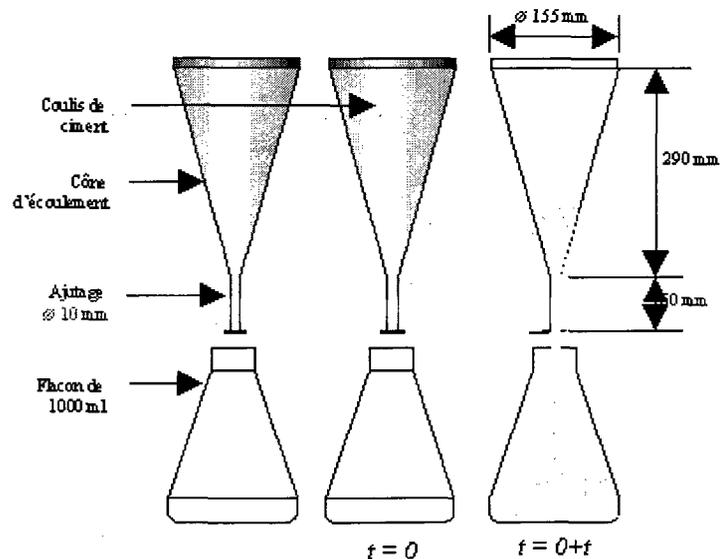


Figure 3.7 Dimension du Cône de Marsh (Cône d'écoulement) [PHOUMMAVONG, s.d.]

3.5.2 Essais sur mortiers

Les essais effectués sur mortiers consistent à la détermination de l'activité pouzzolanique des poudres et de la résistance à la réaction alcalis-granulats accélérée sur les barres de mortiers.

a- Activités pouzzolaniques

L'essai a été réalisé selon les recommandations de la norme ASTM C311 et a consisté à la confection des mortiers incorporant 0, 10, 20 et 30 % de poudre de verre en substitution partielle du ciment. Le mélange avec 0 % de poudre est le mélange témoin dont le rapport E/L est de 0,484, recommandé par la norme. La maniabilité des mélanges est évaluée par la mesure de l'étalement à l'aide du mini-cône d'affaissement et d'une règle graduée Vernier. Le mini-cône d'affaissement est posé sur la table à chocs et rempli en deux couches pilonnées chacune de 20 coups au moyen d'une réglette de section rectangulaire. Après avoir bien arasé la dernière couche, le cône est soulevé verticalement, ensuite l'échantillon est soumis à une vibration par 25 secousses au moyen de la table à chocs puis on mesure l'étalement. Le dosage en eau des autres mélanges de poudre est ajusté pour avoir l'étalement proche de celui du témoin à ± 5 %. Les mélanges confectionnés servent à la fabrication des cubes de 50 x 50 x 50 mm, dont les résistances à la compression sont déterminées à 1, 7, 28 et 91 jours. Ces résistances à la compression permettent de calculer l'activité pouzzolaniques à différents âges des mélanges. L'activité pouzzolanique de la poudre à un âge donné est le rapport exprimé en pourcentage de la résistance du mélange sur celle du témoin au même âge.

b- Résistance à la réaction alcalis-granulats sur mortiers

Les essais de la réaction alcalis-granulats sont effectués sur des barres de mortiers suivant la norme CSA A23.2-25A. L'essai consiste à déterminer l'expansion accélérée sur des barres de mortiers. L'objectif de cet essai est d'évaluer l'efficacité de la poudre de verre dans le contrôle de la réaction alcalis-silice. L'essai dure normalement 14 jours prescrit par la

norme, mais il a été prolongé jusqu'à 28 jours avec deux mesures par semaine, dans l'optique de suivre un peu plus longtemps l'évolution de l'expansion en présence de la poudre de verre. Les mélanges ont été confectionnés avec des granulats Spratt broyés et tamisés aux tamis 2,5 mm, 1,25 mm, 630 μm , 315 μm et 160 μm . Le rapport massique de granulat sur ciment est de 2,25 et celui de l'eau sur ciment est de 0,50. Les barres de mortiers sont complètement immergées dans une solution de soude (1N NaOH) et mises à l'étuve à une température de $80 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'aux échéanciers de l'essai où les mesures sont prises à l'aide d'un comparateur, figure 3.8. L'expansion est déterminée comme le rapport entre la variation de longueur de l'échantillon au moment d'essai et sa longueur initiale avant l'application de la solution basique.

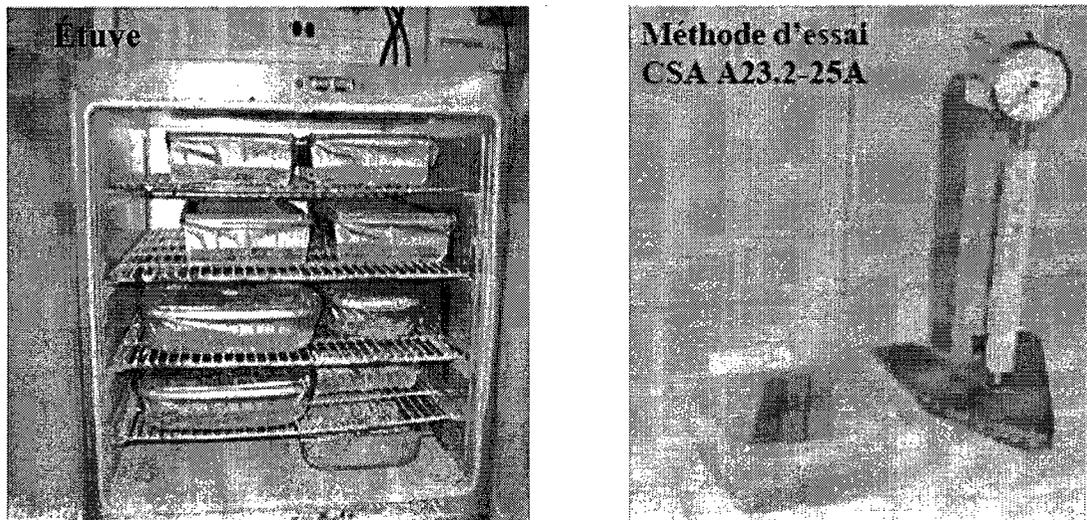


Figure 3.8 Essai accéléré de la réaction alcalis-granulat sur les barres de mortiers

3.6 Essais sur bétons

La phase III de cette étude porte sur le comportement à l'état frais et durci de trois catégories de bétons notamment bétons conventionnels, bétons à haute performance et bétons autoplaçants incorporant la poudre de verre. Deux étapes ont caractérisé cette phase : optimisation et échantillonnage.

L'optimisation a pour but d'ajuster les paramètres à l'état frais (affaissement et teneur en air) des mélanges de différentes catégories de bétons, en déterminant les dosages en adjuvants chimiques requis. L'essai consiste à la confection de petites gâchées de 25 litres des mélanges contenant 0, 20 et 30 % des poudres 6×25, 9×25 et poussière de verre pour chacune des deux premières catégories de bétons étudiés notamment les bétons conventionnels avec $E/L=0,55$ et les bétons à haute performance avec $E/L=0,40$. Pour chaque mélange de ces deux premières catégories de bétons, le dosage en agent entraîneur d'air requis pour obtenir un volume d'air compris entre 5 et 8 % a été déterminé. De plus pour les bétons à haute performance, un dosage en superplastifiant nécessaire pour avoir un affaissement de 200 ± 20 mm, a été déterminé. Des moules cylindriques de 100 x 200 mm sont échantillonnés pour évaluer la résistance à la compression et la pénétrabilité aux ions chlore de ces mélanges. Quant aux bétons autoplaçants avec $E/L = 0,40$, l'optimisation a porté sur des mélanges de 20 % des cendres volantes de classe F et 0, 20 et 30 % de poudre de verre 6×25. Le dosage en agent colloïdal est maintenu constant pour tous les mélanges, seul le dosage en superplastifiant est ajusté pour obtenir l'étalement de $650 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ visé.

L'échantillonnage des bétons pour les différents essais programmés dans cette étude a été réalisé au moyen d'un malaxeur d'une capacité nominale de 100 litres.

La procédure de malaxage des gâchées de bétons conventionnels et à haute performance adoptée dans cette étude est la suivante :

- Introduire le sable dans le malaxeur et malaxer pendant 1 minute pour homogénéiser;
- Calculer l'humidité du sable et apporter les corrections nécessaires sur le sable et l'eau;
- Introduire la pierre et malaxer pendant 40 secondes pour homogénéiser;
- Introduire la moitié de l'eau de gâchage et malaxer pendant 45 secondes;
- Sans arrêter le malaxeur, introduire l'agent entraîneur d'air et malaxer encore pendant 35 secondes;
- Arrêter le malaxeur, introduire les liants, remettre le chronomètre à zéro puis malaxer pendant 30 secondes;
- Sans arrêter le malaxeur, introduire le reste de l'eau + superplastifiant et poursuivre le malaxage pendant 3 minutes;

-
- Laisser reposer le béton dans le malaxeur pendant 2 minutes puis reprendre le malaxage pour encore 3 minutes, soit une durée totale de 8 minutes à compter de l'introduction des liants ou contact eau-liant.

La procédure utilisée pour toutes les gâchées des bétons autoplacants reste quasiment identique à celle décrite pour les bétons conventionnels et à haute performance, à la seule nuance que, dans ce cas l'eau de gâchage est introduite en trois parties. Le premier tiers est introduit juste après l'introduction des granulats et leur homogénéisation avec le sable. Le second tiers mélangé avec le superplastifiant est introduit à 30 secondes après l'introduction des liants, le malaxage se poursuit jusqu'à une minute 30 secondes du contact eau-liant où on introduit le dernier tiers mélangé de l'agent colloïdal puis le malaxage est arrêté à 3 minutes du contact eau-liant. On laisse reposer 2 minutes puis on reprend le malaxage pendant 3 minutes. Le mélange est laissé de nouveau au repos pendant 2 minutes avant de commencer les essais à l'état frais.

Le dosage en liant est de 350, 400 et 440 kg/m³ respectivement dans les bétons conventionnels, bétons à haute performance et bétons autoplacants. Les essais effectués sont décrits dans les sections suivantes.

3.6.1 Affaissement

L'essai d'affaissement selon la norme ASTM C143 est utilisé pour déterminer la consistance de nos gâchées de bétons conventionnels et à haute performance. L'affaissement est mesuré à 10 min et à 30 min après contact eau-liant. L'équipement utilisé consiste en un cône d'affaissement qui est un moule métallique conique de 300 mm de hauteur, de 200 mm de diamètre de base et 100 mm de diamètre au sommet puis en une tige d'acier de 16 mm de diamètre et ayant une longueur comprise entre 450 mm et 600 mm avec une extrémité hémisphérique. Le cône humidifié est placé verticalement sur une surface solide, plane et non absorbante. On le remplit en trois couches de même volume approximativement et pilonnée à 25 coups chacune. Après le pilonnage et l'arasement de la dernière couche, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse, figure 3.9. Le cône vide est placé à proximité du béton.

L'affaissement est la différence entre la hauteur du cône et celle de l'échantillon affaissé, à partir du centre de la surface supérieure du béton, mesuré à 10 mm près.

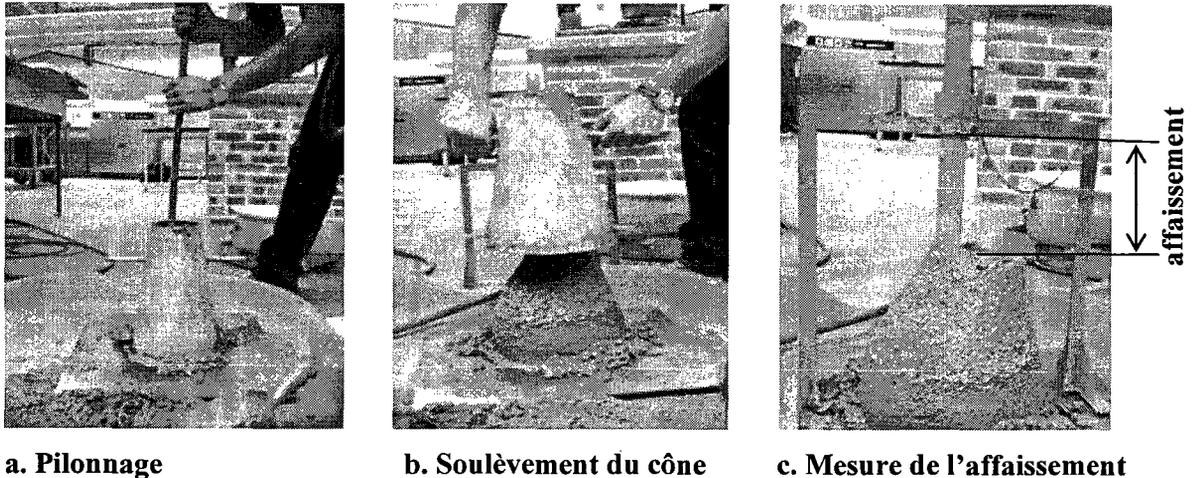


Figure 3.9 Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams [NORME NFP 18-451]

3.6.2 Masse volumique

La masse volumique de tous les bétons est mesurée selon la méthode d'essai de la norme ASTM C138 ou CSA A23.2-6C. Le récipient utilisé est le contenant d'un air-mètre de 7,02 litres de volume, également utilisé pour déterminer la teneur en air. Le principe consiste à tarer ce contenant, à le remplir en trois couches de même volume et pilonné à 25 coups par couche à l'aide de la tige en acier dont l'extrémité est hémisphérique. La dernière couche est bien arasée et l'ensemble est pesé sur une balance calibrée à $\pm 0,1$ g près. La masse volumique du béton est obtenue par le rapport entre la masse du béton et le volume du contenant. Ce même échantillon servira également à la détermination de la teneur en air. Il est à souligner que l'air-mètre n'est plus rempli en 3 couches de 25 coups chacune pour les bétons autoplacants mais plutôt en une seule couche de 5 coups au total.

3.6.3 Teneur en air du béton frais

Du fait que l'action néfaste du gel-dégel est due à l'expansion de l'eau lors du gel, il est logique de supposer que, si l'eau excédentaire peut s'échapper facilement dans un vide

adjacent rempli d'air, les désordres dans le béton seront évités, ce qui est le principe sous-jacent de l'entraînement d'air. Le volume d'air entraîné dans le béton frais peut être mesuré par trois différentes méthodes notamment la méthode gravimétrique, la méthode volumétrique et la méthode pressiométrique. C'est la dernière méthode qui est utilisée dans notre étude compte tenu de la fiabilité des résultats et de sa meilleure adaptation aux usages de chantier. Elle est réalisée selon la norme ASTM C231 ou CSA A23.2-7C. Son principe repose sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Boyle Mariotte. L'appareil utilisé, figure 3.10, est un air-mètre gradué en teneur en air. La procédure de l'essai consiste essentiellement à appliquer une pression sur un échantillon de béton à l'aide d'une pompe. La pression appliquée comprime l'air contenu dans le béton. Le volume de l'air comprimé, représentant la teneur en air du béton, exprimé en pourcentage, est mesuré au moyen d'un manomètre. Cette teneur en air est lue directement par un opérateur.

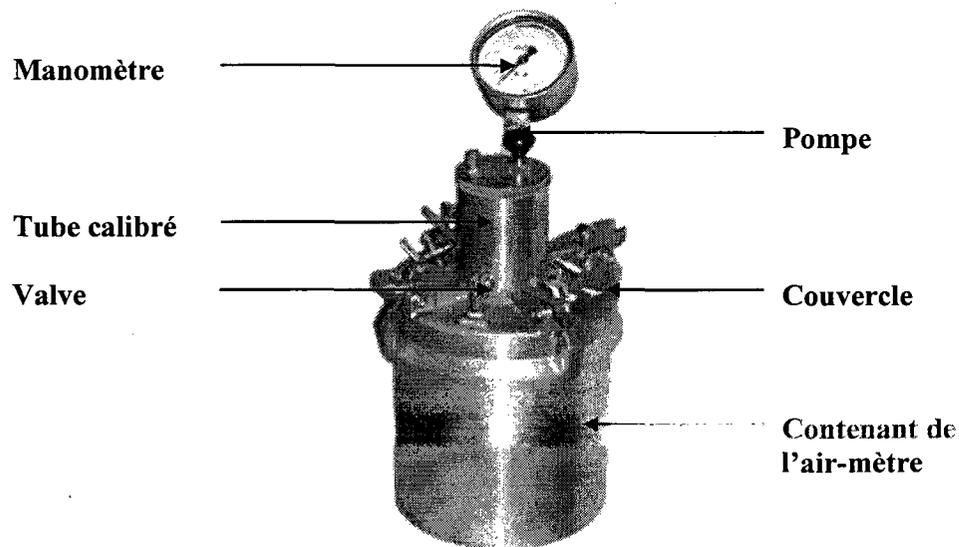


Figure 3.10 Mesure de la teneur en air du béton frais

3.6.4 Température

Étant donné que la température du béton a une grande influence sur les propriétés du béton frais et durci, beaucoup de spécification limitent la température du béton frais. À cet effet la température des gâchées est mesurée au moyen des thermomètres électroniques précis avec affichage numérique selon la norme ASTM C1064. Le principe consiste à introduire la

portion sensible du thermomètre d'environ au moins 75 mm dans un échantillon représentatif du béton pendant au moins 2 minutes ou mieux jusqu'à ce que la lecture se stabilise. Cette température est mesurée à chaque échancier prévu pour prendre les mesures des propriétés à l'état frais.

3.6.5 Étalement

L'essai d'étalement permet d'évaluer la déformabilité du BAP. Il est réalisé suivant la norme ASTM C1611 au moyen du cône d'Abrams. Le cône est rempli du béton en une couche puis soulevé lentement, compte tenu de la fluidité du béton et l'effet des forces de pesanteur, le béton s'étale, figure 3.11. On mesure deux diamètres perpendiculaires de l'étalement pour en calculer la moyenne. Cette valeur moyenne du diamètre représente l'étalement du béton étudié.



Figure 3.11 Mesure de l'étalement du BAP [Swedish Concrete Association, 2002]

3.6.6 Capacité de remplissage

L'essai consiste à remplir de béton jusqu'à une hauteur de 220 mm, une cuvette transparente en acrylique de dimension 500 × 300 × 300 mm, munie de tuyaux de diamètre 16

mm espacés de 34 mm. Le béton est versé à travers un entonnoir avec un débit moyen de 0,2 l/sec et s'écoule ensuite entre les tuyaux, figure 3.12. La capacité de remplissage est obtenue par le rapport $A/(A+B)$, exprimé en pourcentage, où A étant l'aire de la zone remplie de béton et B celle de la zone vide.

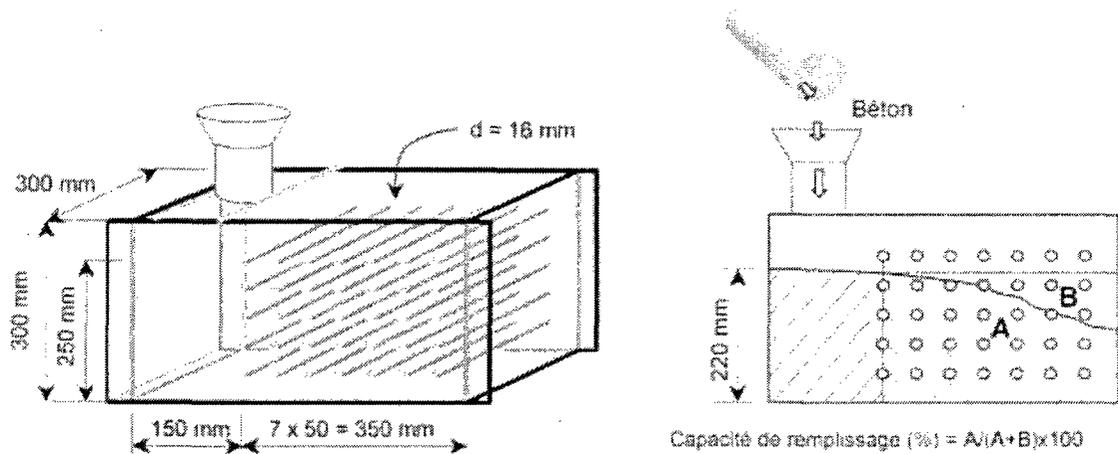


Figure 3.12 Évaluation de la capacité de remplissage [Yurugi et coll., 1989]

3.6.7 J-Ring

L'essai consiste à évaluer la capacité du BAP à s'écouler à travers les obstacles étroitement alignés [Bartos, 1998]. Le dispositif utilisé, figure 3.13, est constitué d'un anneau en acier muni de barres. Ces barres peuvent être de différents diamètres et espacées à intervalles différents. En tenant compte des conditions normales de renforcement, un espacement de 3 fois le diamètre maximal du gros granulat est considéré comme approprié. L'anneau a un diamètre de 300 mm et une hauteur de 100 mm. L'anneau est placé autour de la base du cône d'Abrams qui sera rempli du béton et soulevé. On mesure le diamètre moyen de l'étalement du béton qui s'est écoulé à travers les barres d'armatures.

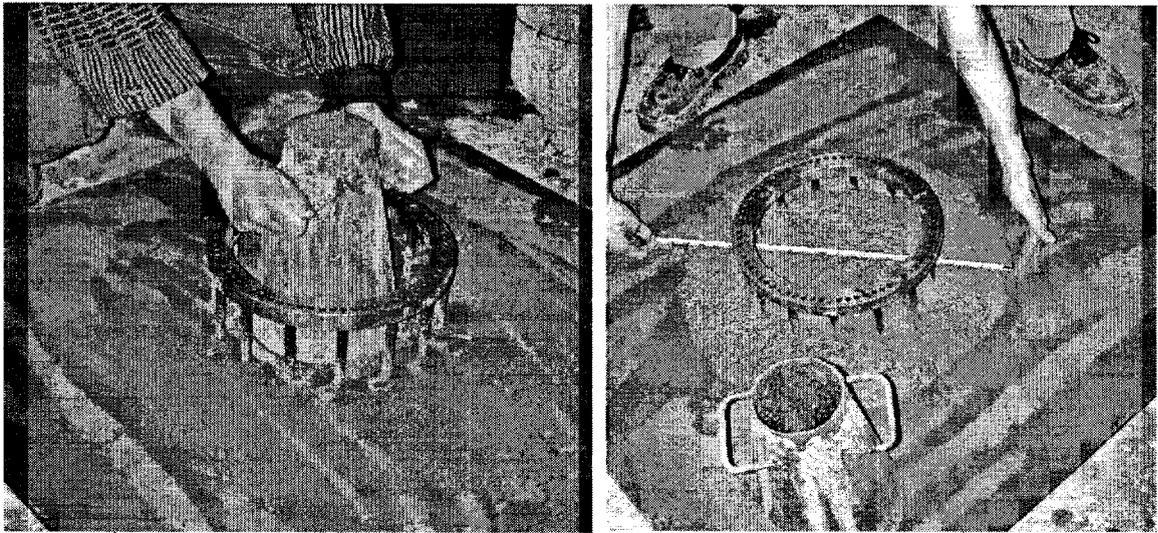


Figure 3.13 Essai de J-Ring [Swedish Concrete Association, 2002]

3.6.8 V-Funnel

Cet essai sert à évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées par mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir. Aussi, cet essai effectué au moyen du dispositif illustré à la figure 3.14, permet d'apprécier les propriétés du mortier et le degré d'interférence des gros granulats par la mesure de la vitesse d'écoulement.

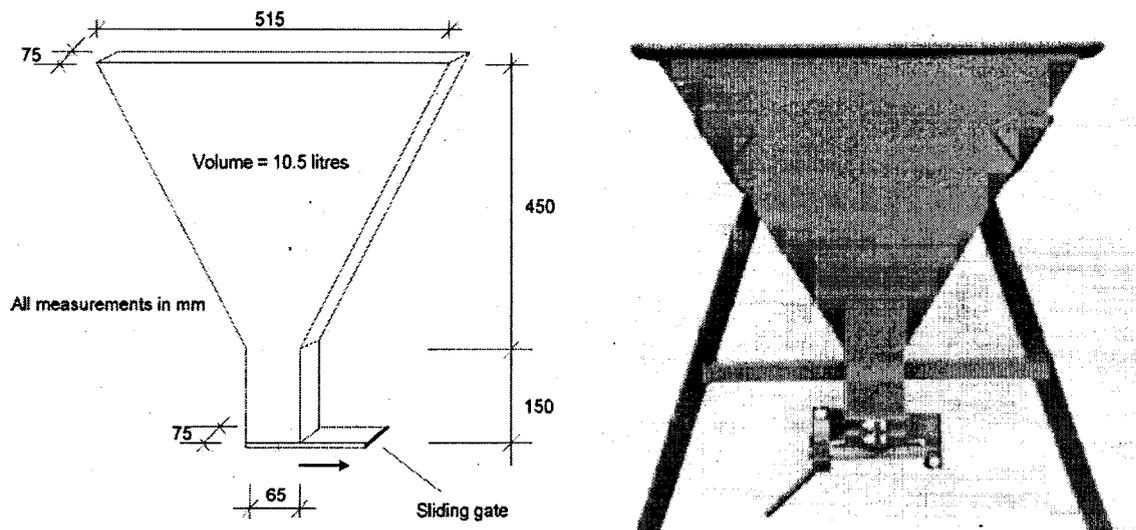


Figure 3.14 Entonnoir en V [Swedish Concrete Association, 2002]

3.6.9 L-Box

L'essai du L-Box se compose d'un dispositif en forme de L, figure 3.15. La partie verticale est entièrement remplie de béton, laissée au repos pendant 1 minute puis on soulève la trappe séparant les deux compartiments vertical et horizontal. Le béton s'écoule à travers des barres de renforcement. Un espacement de 35 mm entre les barres de renforcement de 14 mm de diamètre est choisi pour les BAP dont la taille maximale des gros granulats est de 14 mm. Le temps de l'écoulement dans la partie horizontale est noté, ainsi que les hauteurs H_1 et H_2 qui sont des hauteurs libres au dessus du béton respectivement dans la partie verticale et horizontale. On calcule $h_1 = 600 - H_1$ et $h_2 = 150 - H_2$ puis le rapport h_2/h_1 , appelé blocking ratio qui est une indication de la déformabilité du BAP. Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas confrontée au phénomène de blocage.

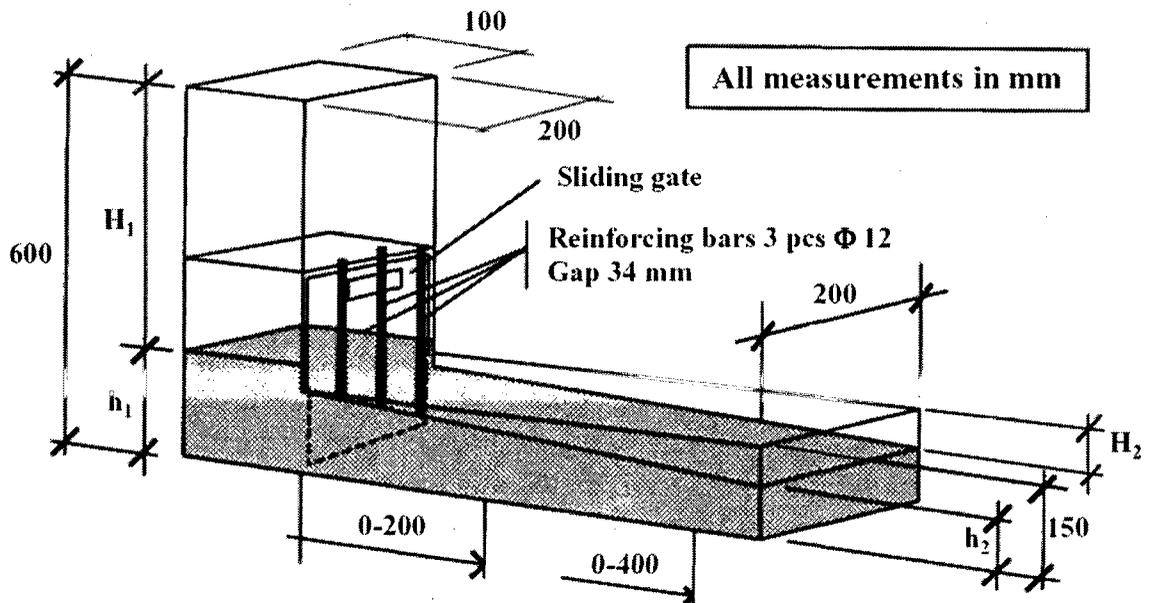


Figure 3.15 Essai de l'écoulement en L [Swedish Concrete Association, 2002]

3.6.10 Colonne de ségrégation

L'essai consiste à verser le béton dans une colonne cylindrique de 660 mm de hauteur et 200 mm de diamètre, figure 3.16 et à déterminer la variation de concentration relative des

granulats dans quatre sections différentes prises dans la hauteur de l'échantillon. Le tube en PVC est subdivisé en quatre section de 165 mm de hauteur chacune, séparées par des joints anti fuites. Après remplissage du tube, le béton est consolidé par pilonnage de 5 coups à l'aide de la tige d'acier de 16 mm de diamètre, puis laisser au repos pendant 15 minutes. On recueille du haut vers le bas de la colonne, les bétons de chaque section dans une tare. Ces bétons sont pesés puis lavés sur un tamis de 5 mm pour séparer le mortier des granulats. Les granulats sont séchés puis pesés. On calcule le rapport entre la masse des granulats et celle du béton de chaque section puis le coefficient de variation de ces rapports. Ce coefficient de variation (CV) de la distribution des granulats le long de la colonne représente l'indice de ségrégation du béton étudié.

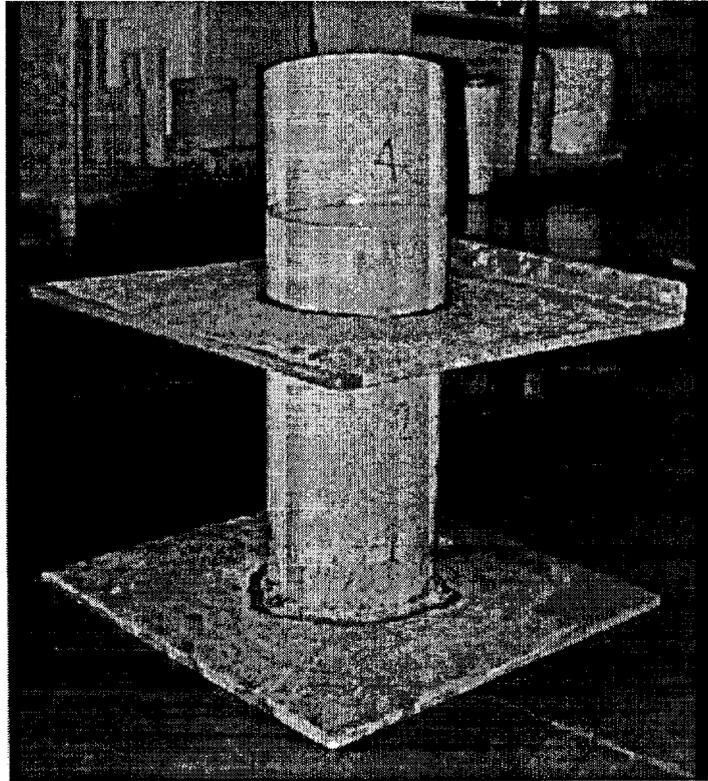


Figure 3.16 Colonne de l'essai de ségrégation [Assaad et coll., 2004]

3.6.11 Rhéologie

Le rhéomètre utilisé est le rhéomètre modifié de Tattersall MKIII, figure 3.17, qui se compose d'une pale en forme de H, figure 3.18, ayant un mouvement planétaire qui cisaille le béton à divers taux de cisaillement. Durant l'essai, la pale est conduite à différentes vitesses angulaires dans la cuvette remplie de béton et le couple moment-vitesse angulaire est mesuré. Le protocole d'essai consiste à augmenter graduellement la vitesse angulaire en la variant de 0,03 à 0,09 tour/seconde puis le moment requis pour cisailer le béton et la vitesse de rotation sont enregistrés. Au total, trois mesures sont prises à chaque vitesse pour déterminer le couple moyen correspondant. Les propriétés rhéologiques notamment le seuil de cisaillement, τ_0 et la viscosité plastique, μ_{pl} , dérivent d'une régression linéaire des lectures du moment en considérant que le béton se caractérise par un comportement Binghamien.

Compte tenu de la géométrie de la palette, le couple mesuré à l'axe central de la palette peut être converti en effort de cisaillement sur la surface cisailée entourée par la palette comme suit :

$$T = 2\pi R^2 H \tau + 2 \int_0^{2\pi} \int_0^R \tau_e r^2 dr d\theta \quad 3.4$$

Où T est le couple mesuré à l'axe central de la palette, $2\pi RH$ est la surface latérale de la section cisailée, τ est l'effort de cisaillement latéral, le deuxième terme de cette équation est dû à la contrainte de cisaillement sur le fond supérieur, τ_e du cylindre cisailé. On assume que l'effort de cisaillement est réparti uniformément sur la surface entière du cylindre cisailé. La contrainte de cisaillement (τ_e) agissant sur les deux extrémités de la surface est estimée en utilisant l'équation suivante :

$$\tau_e = \left(\frac{r}{R}\right)^m \tau \quad (\text{avec } r = R, \tau_e = \tau) \quad 3.5$$

L'approche adoptée dans cette étude suppose que la distribution de τ_e à travers les surfaces d'extrémités est linéaire, et donc $m = 1$, soit :

$$\tau_e = \left(\frac{r}{R}\right) \tau \quad 3.6$$

En remplaçant l'expression de τ_c dans l'expression 3.4 on obtient l'expression suivante de la contrainte de cisaillement.

$$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 H + \pi R^3} \quad 3.7$$

Où T est en N.m, R et H en m et la contrainte de cisaillement τ en Pa.

En considérant que le béton présente le comportement d'un fluide Binghamien, la contrainte de cisaillement s'exprime par la relation :

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} * \gamma \quad 3.8$$

Où τ_0 est le seuil de cisaillement en Pa

μ_{pl} est la viscosité plastique en Pa.s, et

γ est le taux de cisaillement.

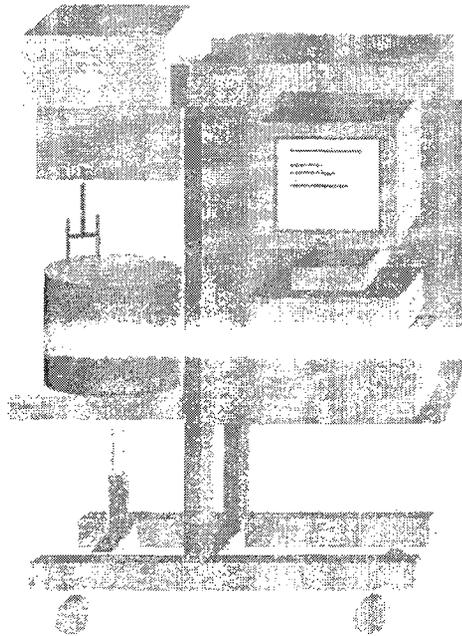


Figure 3.17 Représentation schématique du rhéomètre [Beaupré, 1994]

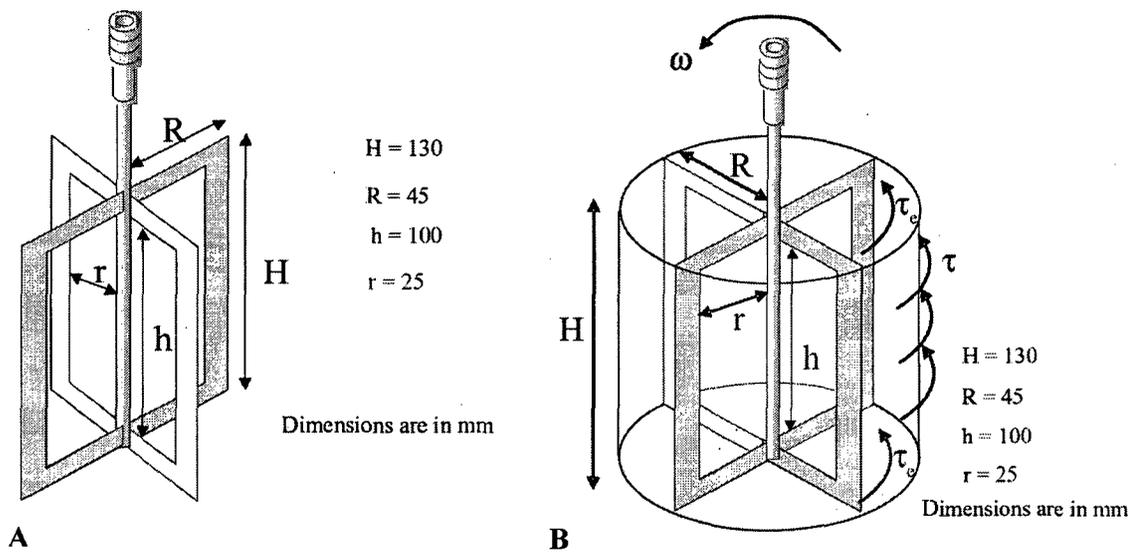


Figure 3.18 Géométrie de la palette utilisée pour le rhéomètre (A) et Surface cylindrique formée par la palette en mouvement (B) [Beaupré, 1994]

3.6.12 Temps de prise

Le temps de prise du béton est déterminé conformément à la norme ASTM C403. Cet essai permet de mesurer à intervalles de temps réguliers la résistance à la pénétration des aiguilles de différents diamètres dans un mortier tamisé à partir du mélange de béton sur un tamis de 5 mm et recueilli dans un moule cylindrique en PVC de diamètre 150 mm et de profondeur 175 mm. Les temps de prise initiale et finale correspondent à des résistances de pénétration de 3,4 MPa et 27,6 MPa, respectivement. Le temps de prise est un paramètre qui contrôle ou mieux influence la vitesse de mise en place du béton. La température, le rapport eau/liant et les adjuvants ont toujours une influence sur le temps de prise.

3.6.13 Prélèvement des échantillons et mûrissement

Le prélèvement des échantillons a été effectué suivant la norme ASTM C192. Les moules cylindriques de 100×200 mm sont remplis en deux couches d'égal volume et pilonnées à 25 coups chacune par la tige en acier de diamètre 10 mm et dont l'extrémité est hémisphérique. Les échantillons sont bien arasés dans les moules, recouverts de plaques

rigides pour limiter l'évaporation de l'eau puis entreposés à l'air sur une table pendant 24 heures. Des prismes de différentes dimensions et de plaques sont également échantillonnés. À l'âge de 24 ± 4 heures, les échantillons sont démoulés puis mûris dans une chambre humide à une température de $23,0 \pm 2^\circ\text{C}$ et humidité relative de 100 % qui sont permanemment bien contrôlées jusqu'aux échéanciers des essais.

3.6.14 Résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression est réalisé sur des cylindres de 100×200 mm, figure 3.19, conformément à la norme ASTM C39. Les valeurs de la résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours sont des moyennes de deux à trois cylindres. Les cylindres sont surfacés pour favoriser un meilleur contact entre ces derniers et les plateaux de la presse lors de l'écrasement. La capacité maximale de la presse est de 1779,2 kN. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est de 5000 lb/10 s soit 0,28 MPa/s.

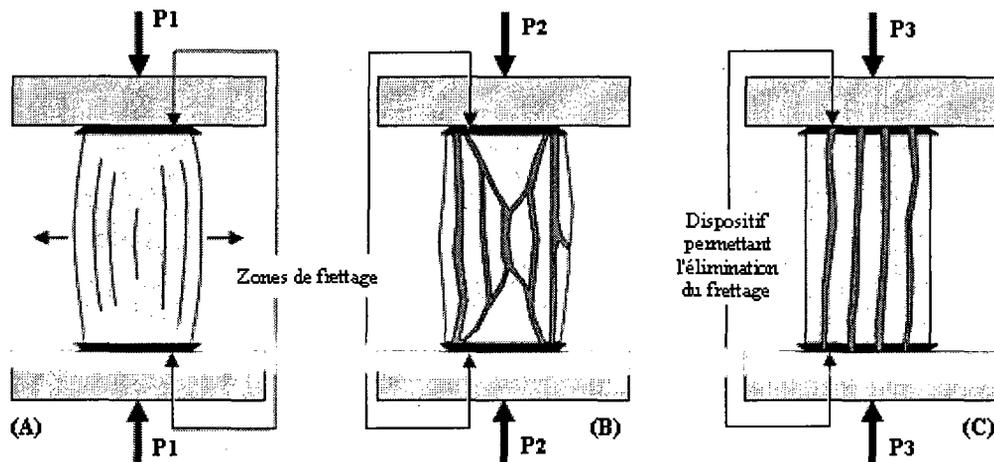


Figure 3.19 Mode de rupture des éprouvettes cylindriques à la compression [PHOUMMAVONG, s.d.]

3.6.15 Résistance en traction par fendage

L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM C496, sur des cylindres de 100×200 mm, figure 3.20. Les valeurs de la résistance à la traction retenues à 28 jours et 91 jours

représentent la moyenne des résultats obtenus sur deux échantillons. Une presse hydraulique d'une capacité maximale de 270 kN a été utilisée. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est de 1200 lb/10 s soit 1 MPa/min.

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \quad 3.9$$

avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

D et L = diamètre et longueur du cylindre.

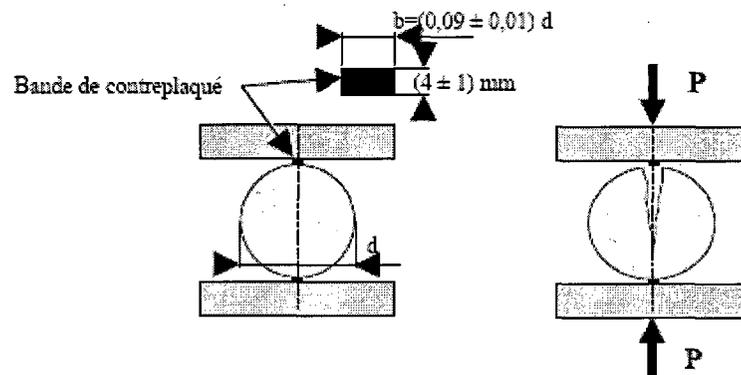


Figure 3.20 Dispositif de l'essai de traction par fendage [PHOUMMAVONG, s.d.]

3.6.16 Résistance en flexion

Dans cet essai effectué selon la norme ASTM C78, un prisme de 100 × 100 × 400 mm de béton non armé, figure 3.21, est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge en deux points symétriques. Les points d'application de la charge sont placés au tiers de la portée. L'essai est également appelé l'essai de chargement au tiers. La contrainte théorique maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspond au module de rupture.

Lorsque la rupture ait lieu au tiers central de l'échantillon, le module de rupture est

obtenu par la formule :
$$R = \frac{PL}{bd^2}$$
 3.10

Où

R = le module de rupture,

P = charge maximale appliquée

L = longueur de l'échantillon

b = largeur de l'échantillon

d = profondeur de l'échantillon

Si la rupture a lieu en dehors du tiers central, mais à une distance, α de l'appui le plus proche, inférieure à 5 % de la longueur totale L de l'échantillon, le module de rupture est

calculé comme suit :
$$R = \frac{3P\alpha}{bd^2}$$
 3.11

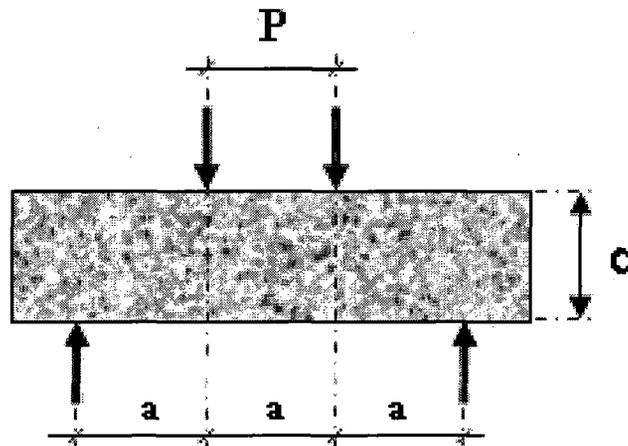


Figure 3.21 Essai de flexion

3.6.17 Module d'élasticité

Cet essai est réalisé selon la norme ASTM C 469 sur des cylindres 100 × 200 mm. Il consiste à déterminer le rapport contrainte-déformation longitudinale dans la région élastique de la courbe contrainte-déformation d'un béton, donnée par la figure 3.22. Ce rapport définissant le module d'élasticité (E) de ce béton peut s'exprimer comme suit :

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad 3.12$$

Où E est le module d'élasticité en psi;

S_2 est la contrainte correspondante à 40 % de la charge ultime;

S_1 est la contrainte correspondante à la déformation longitudinale $\varepsilon_1 = 0,000050$

ε_2 est la déformation produite par la contrainte S_2 .

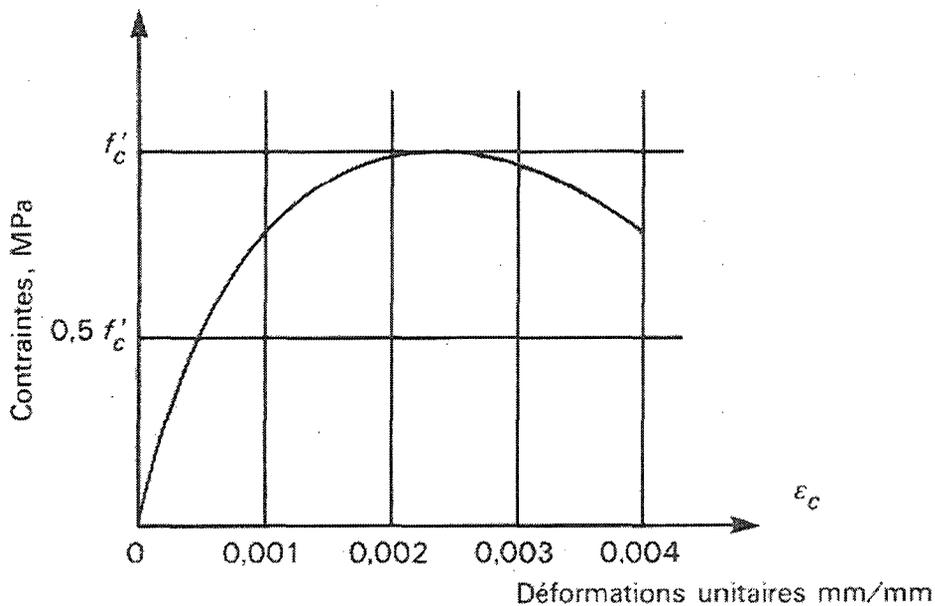


Figure 3.22 Courbe de contrainte-déformation [TERRIER, 2005]

3.6.18 Retrait de séchage

Cet essai sert à déterminer le changement de longueur d'un échantillon de béton causé par le séchage. L'essai est effectué sur des échantillons de $75 \times 75 \times 285$ mm, suivant la norme ASTM C157M – 04. Après démoulage à 24 heures, les échantillons sont directement immergés dans l'eau saturée en chaux durant 30 minutes, puis ressortis pour les lectures initiales et ensuite retournés pour y séjourner durant 27 jours. À partir de 28 jours depuis la fabrication du béton, les échantillons sont sortis de l'eau, une seconde mesure est immédiatement prise puis ils sont conservés à l'air dans une chambre à une température de 23

$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de $50 \pm 4 \%$ où se poursuit la mesure du retrait suivant les échéanciers de la norme. Ces échéanciers sont de 4, 7, 14, 28 jours et 8, 16, 32 et 64 semaines à partir de la conservation dans l'air. Les mesures sont prises au moyen d'un comparateur, figure 3.23 et le retrait est calculé en pourcentage de la longueur initiale de l'échantillon par la formule :

$$\Delta L_x = \frac{CRD - initialCRD}{G} \quad 3.13$$

Où ΔL_x : Retrait (%);

CRD : Lecture du comparateur à l'échéancier X (mm);

InitialCRD : Lecture du comparateur juste après le démoulage (mm)

G : Longueur initiale de l'échantillon (mm).

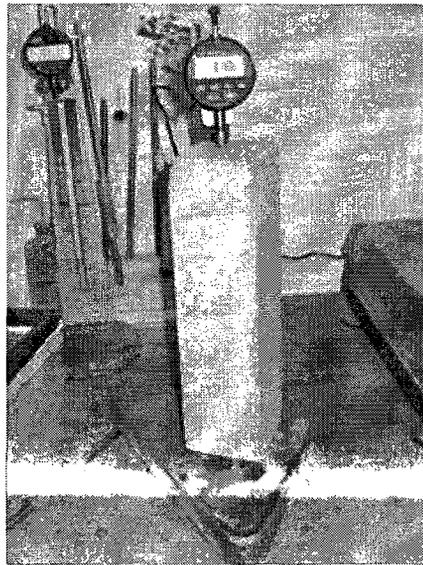


Figure 3.23 Mesure du retrait de séchage

3.6.19 Réseau d'air dans le béton durci

Cet essai consiste à mesurer, à l'aide du microscope optique et à partir d'un réseau de lignes horizontales, les principales caractéristiques du réseau d'air entraîné dans le béton durci, selon la norme ASTM C457. Les principales caractéristiques mesurées sont le facteur d'espacement \bar{L} qui représente la demi-distance moyenne entre deux bulles d'air, la surface

spécifique α des bulles d'air et leur volume ou teneur en pourcentage. Le facteur d'espacement \bar{L} est la caractéristique étroitement liée au diamètre des bulles d'air et contrôle mieux la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel.

3.6.20 Résistance au gel-dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel a été évaluée selon la norme ASTM C666, procédure A, sur deux éprouvettes de $75 \times 75 \times 350$ mm munies de plots sur leurs deux faces latérales. Le premier cycle a été appliqué sur les poutres à 14 jours comme prévu dans la norme. Les échantillons subissent 6 cycles par jour à température variable de -18°C à $+4^{\circ}\text{C}$. Le temps de passage d'une onde ultrasonore (en μsec) d'une fréquence longitudinale, communément appelé pundit, perte de masse et les déformations longitudinales ont été mesurés chaque semaine et permettent de déterminer le facteur de durabilité.

3.6.21 Résistance à l'écaillage

La résistance à l'écaillage des bétons exposés aux sels de déverglaçage (solution aqueuse de 3 % massique de NaCl) a été évaluée sur des plaques mûries dans la chambre humide jusqu'à 14 ou 77 jours respectivement pour les échéanciers prévus pour l'essai de 28 jours et 91 jours. L'essai est réalisé suivant la norme BNQ 2621-900 sur des plaques d'au moins 500 cm^2 de surface utile et d'épaisseur 75 mm. En effet pour l'échéancier de 28 jours les plaques sont sorties de la chambre humide après 14 jours d'âge puis conservées dans l'air dans une chambre à une température de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 4 \%$. Le cadrage est effectué à 21 jours, la solution saline est appliquée à 28 jours et maintenue pendant 7 jours avant que les cycles de gel-dégel ne débutent à partir de 35 jours. Quant à l'échéancier de 91 jours, les plaques sont sorties de la chambre humide après 77 jours d'âge puis conservées dans les mêmes conditions décrites précédemment. Le cadrage est effectué à 84 jours, la solution saline est appliquée à 91 jours et maintenue pendant 7 jours avant que les cycles de gel-dégel ne débutent à 98 jours.

Un cycle de gel-dégel a une durée de 24 heures consistant en une période de gel de $16\text{h} \pm 1\text{h}$ à une température de -18°C suivie d'une période de dégel de $8\text{h} \pm 1\text{h}$ à une température

de + 23 °C. Ce cycle se répète 56 fois sans interruption. La mesure de l'écaillage est effectuée à 7, 21, 35 et 56 cycles. À chaque mesure, on rince la surface de l'éprouvette avec une eau pure pour enlever tous les débris, qui sont ensuite lavés, filtrés sur un tamis de 80 µm, séchés à l'étuve puis pesés. Les résultats sont exprimés en g/m². À la fin de chaque mesure, la surface de l'éprouvette est examinée visuellement et le type d'écaillage obtenu est caractérisé qualitativement en utilisant le barème du tableau 3.2 suivant.

TABLEAU 3.2 ÉVALUATION QUALITATIVE DE L'ESSAI D'ÉCAILLAGE [BNQ 2621-900].

Cote	Évaluation visuelle de la surface écaillée
0	Aucun écaillage significatif observé
1-A	Écaillage très léger du mortier de surface avec absence de cratères
1-B	Écaillage important du mortier de surface avec absence de cratères
2-A	Aucun écaillage significatif du mortier de surface mais présence de quelques cratères
2-B	Aucun écaillage significatif du mortier de surface mais présence de plusieurs cratères
3	Combinaison du mortier de surface écaillé principalement avec de gros granulats éclatés
4	Combinaison de gros granulats éclatés principalement avec du mortier de surface écaillé

3.6.22 Pénétrabilité des ions chlorures

La pénétrabilité des ions chlorures permet d'évaluer l'interconnectivité des pores dans le béton. Cet essai est effectué suivant la norme ASTM C1202 sur des éprouvettes de 95 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur. Ces éprouvettes sont extraites à partir d'un cylindre de 100 mm de diamètre sur 200 mm de hauteur. L'éprouvette est placée dans une cellule de telle façon que l'une des faces circulaires baigne dans une solution de 3 % de chlorure de sodium (NaCl) dans laquelle se trouve une électrode (cathode) émettrice d'électrons. L'autre face circulaire baigne dans une solution de soude (0,3N de NaOH) où se trouve une autre électrode (anode) qui boucle le circuit. Une différence de potentielle (ddp) de 60 volts est maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette, figure 3.24. L'essai consiste à mesurer la charge

électrique totale, exprimée en coulombs qui passe à travers l'éprouvette pendant 6 heures. La charge mesurée exprime la pénétrabilité aux ions chlore à travers l'échantillon. Les résultats sont interprétés par référence aux valeurs du tableau 3.3 qui exprime le niveau de pénétrabilité aux ions chlore dans l'échantillon en fonction de la charge.

TABLEAU 3.3 ECHELLE DE PENETRABILITÉ DES IONS CHLORE [ASTM C1202-97]

Charge en coulombs	Pénétrabilité des ions chlore
> 4000	Élevée
2000 - 4000	Moyenne
1000 - 2000	Faible
100 - 1000	Très faible
<100	Négligeable

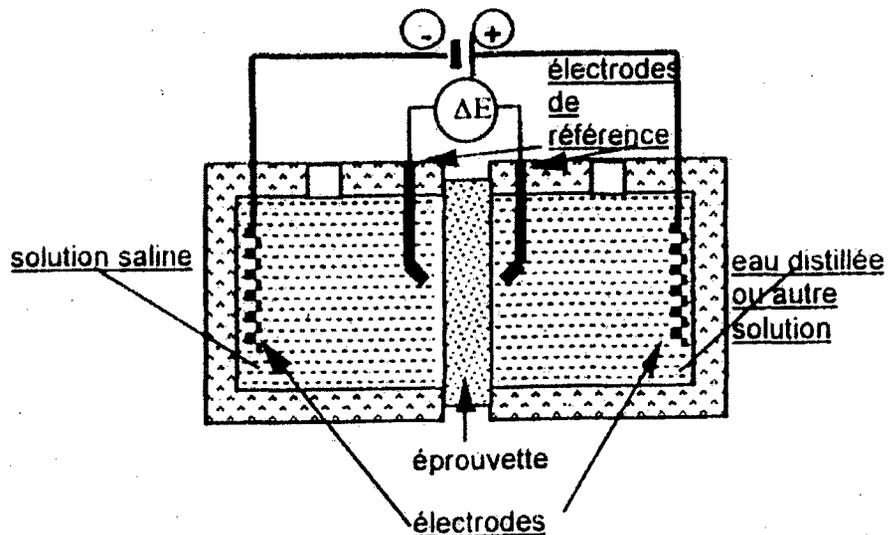


Figure 3.24 Dispositif de l'essai de pénétrabilité aux ions chlore [Notes de cours de durabilité, Automne 2007]

3.6.23 Résistance à la réaction alcalis-granulats sur bétons

Les essais de la réaction alcalis-granulats sont effectués sur les prismes de bétons suivant la norme CSA A23.2-14A. L'essai consiste à déterminer les expansions des bétons causées par la réaction alcalis-granulats. L'objectif de cet essai est d'évaluer l'efficacité de la poudre de verre dans le contrôle de la réaction alcalis-silice. Les prismes sont de dimensions 75 x 75 x 275 mm. Les gros granulats utilisés sont des granulats réactifs de type Spratt divisés en fractions telles que recommandé dans la norme CSA A23.2-14A. Le dosage en liant est de 420 kg/m³ avec un rapport E/L = 0,45. La teneur en alcalis du ciment exprimée en Na₂O_{équivalent} est ajustée à 1,25 % en ajoutant du NaOH dans l'eau de gâchage. Les prismes sont conservés dans des chaudières munies de tissus absorbants permettant de maintenir l'humidité relative constante. L'ensemble est placé dans une étuve à 38°C, jusqu'aux échéanciers d'essais prévus par la norme où l'expansion des prismes est mesurée au moyen d'un comparateur, figure 3.25.

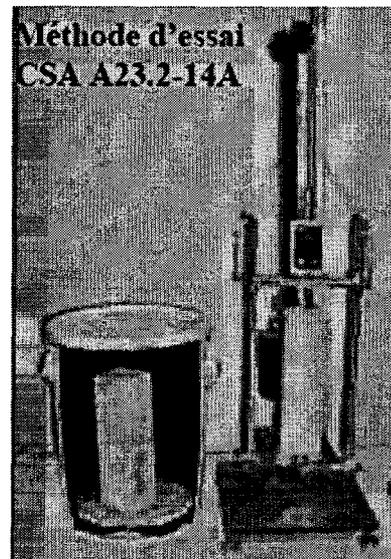


Figure 3.25 Essai de la réaction alcalis-granulats sur prismes de bétons [FOURNIER, s.d.]

Chapitre 4

PRÉSENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1 Caractérisation des matériaux

Cette section porte sur les résultats de la caractérisation des matériaux.

4.1.1 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques déterminées sur les poudres se résument à la densité, la finesse et la granulométrie. Deux différents stocks de ciment type GU ont été utilisés dans cette étude. Le premier stock est constitué des sacs de 30 kg (GU 30) tandis que le second est constitué des sacs de 40 kg (GU 40). Les résultats de la densité et de la finesse sont présentés dans le tableau 4.1 et les courbes granulométriques sont illustrées par les figures 4.1 et 4.2. La figure 4.1 montre les différentes familles de grosseurs de particules composant les poudres, tandis que la figure 4.2 exprime le tamisât cumulatif en fonction des diamètres des particules. Les résultats du tableau 4.1 montrent que les poudres de verre ont une densité plus faible que celle de ciment. La finesse des poudres de verre est comprise entre 90 % et 105 % de celle du ciment type GU dépendamment du temps de broyage. On note à travers les courbes de la figure 4.1 que le ciment présente une distribution unimodale alors que celles des poussières et poudres de verre sont bimodales. Le ciment et toutes les poudres contiennent une proportion importante des particules ayant de diamètre compris entre 10 et 40 μm . Ces proportions sont plus importantes dans le ciment que dans les poudres ou poussière de verre. Le diamètre minimal et maximal du ciment sont respectivement de 0,5 μm et 40 μm alors que ceux des poudres de verre sont respectivement de 0,5 μm et 70 μm . La figure 4.2, montre que le ciment, les poudres de verre broyé 6×25, 9×25 et la poussière ont de diamètres moyens respectifs d'environ 15 μm , 10 μm , 10 μm et 16 μm . On remarque aussi que le ciment contient 40 % de particules ayant des diamètres inférieurs à $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ (le diamètre moyen des poudres du

verre broyé). Pour des particules de diamètres compris entre 10 et 40 μm les proportions respectives du ciment et des poudres de verre sont de 60 % et 42 %. Les poudres de verre contiennent 8 % de particules de diamètres supérieurs à 40 μm , alors que le ciment n'en contient pas. Il ressort de cette analyse que les poudres de verre broyé contiennent plus de particules fines ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$) et grossières ($\varnothing > 40 \mu\text{m}$) que le ciment. Ces observations relatent que la granulométrie des poudres de verre n'est pas autant uniforme que celle du ciment. Ceci est lié aux systèmes de broyage pour chacune des poudres. En effet, le ciment est broyé à l'usine avec un système de broyage approprié et efficace, alors que les poudres de verre sont broyées au laboratoire du béton au moyen d'un broyeur à boulets d'une capacité de 20 kg.

TABLEAU 4.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES MATÉRIAUX

Matériaux	Caractéristiques	
	Densité	Finesse Blaine SSB m^2/kg
Ciment GU	3,15	415
Poudre de verre 6×25	2,52	374
Poudre de verre 9×25	2,52	436
Poussière de verre P6	2,52	n.d (Grossière)
Poussière de verre P7	2,52	390

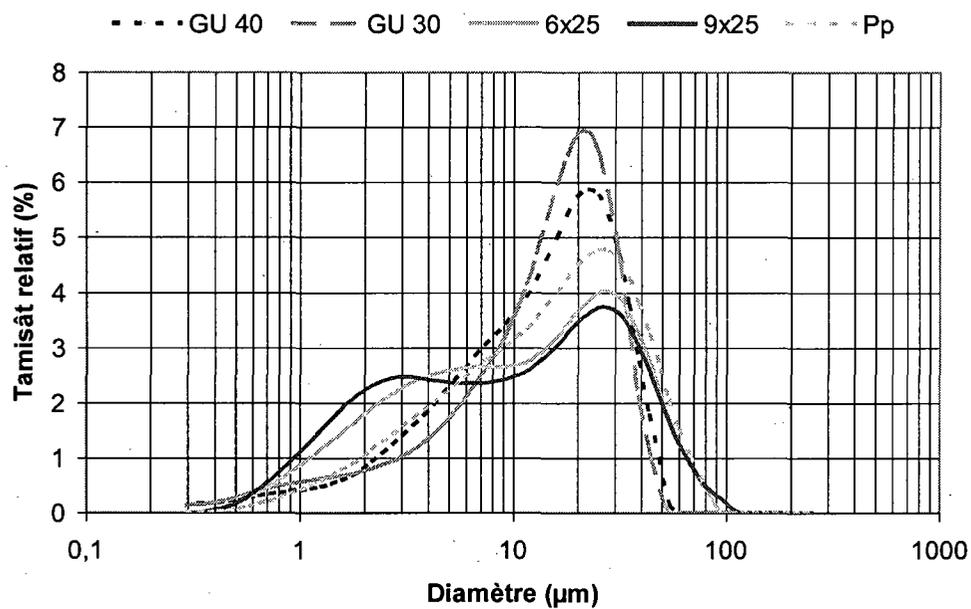


Figure 4.1 Proportion relative des grosseurs des particules des ciments et poudres étudiées

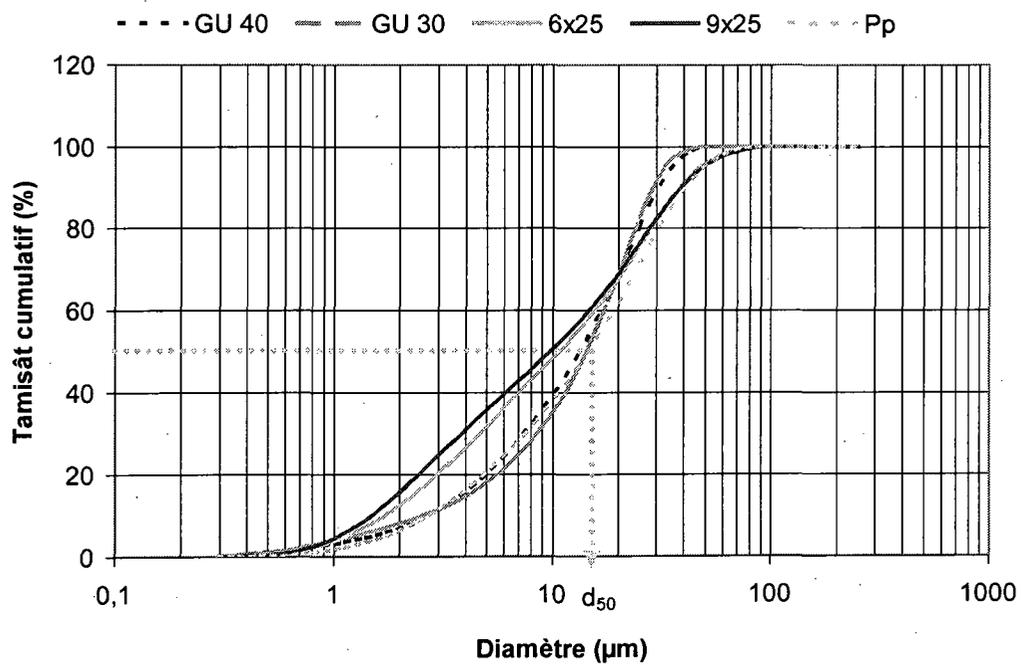


Figure 4.2 Courbes granulométriques des ciments et poudres de verres étudiées

4.1.2 Caractéristiques minéralogiques

La caractérisation minéralogique consiste essentiellement à l'observation au microscope électronique à balayage de la morphologie et la concentration en différents oxydes dans la poudre reflétée par la diffraction des rayons X. Les résultats du MEB sont illustrés par les figures 4.3 à 4.6 et ceux de la DRX par les figures 4.7 et 4.8. On remarque que les particules des poudres présentent des formes angulaires et irrégulières et possèdent une teneur plus importante en silice par rapport aux autres oxydes. La diffraction de la poudre de verre présente un halo de diffusion caractéristique de sa structure amorphe. Par contre celle de ciment présente des pics intenses et étroits montrant la présence des cristaux.

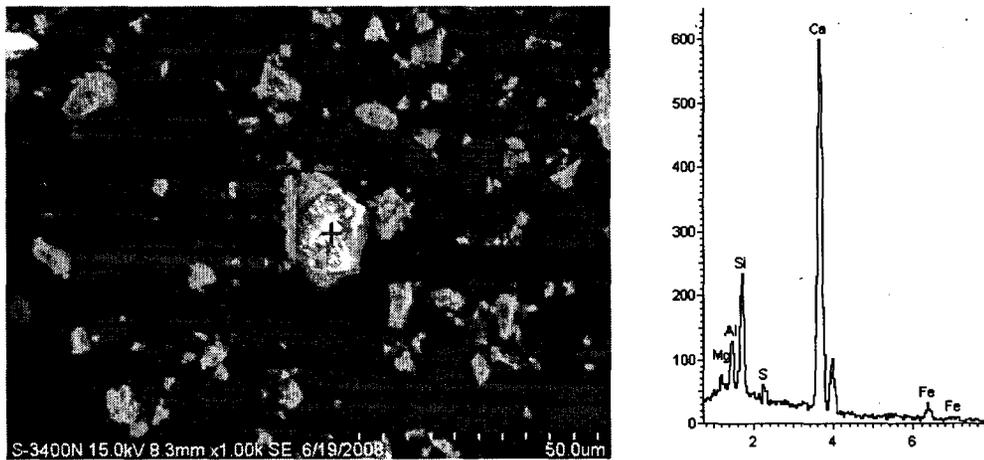


Figure 4.3 Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon du ciment GU

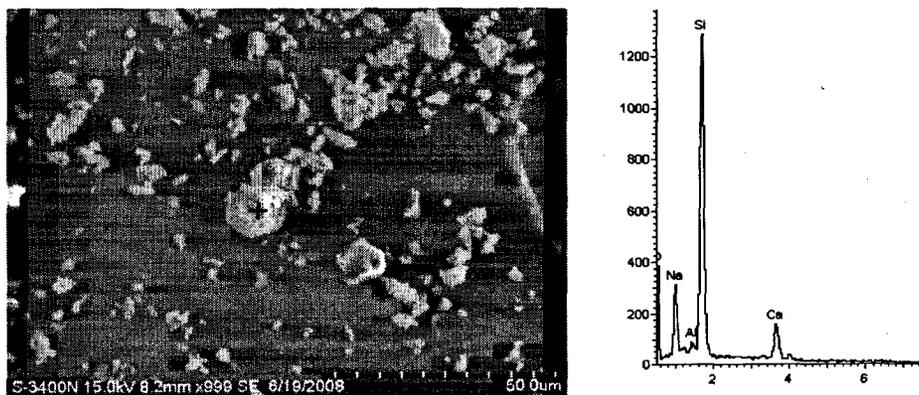


Figure 4.4 Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon de la poudre de verre 6x25

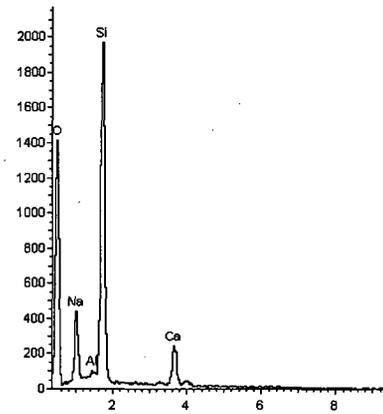
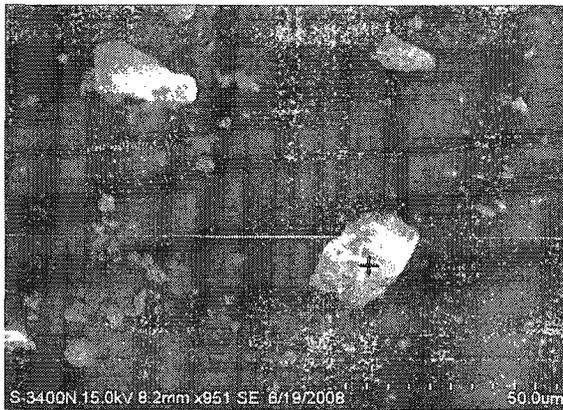


Figure 4.5 Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon de la poudre de verre 9×25

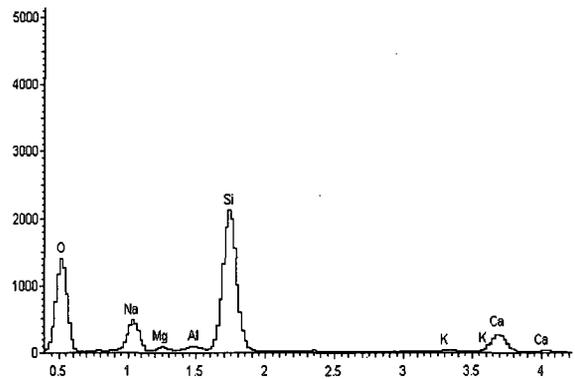


Figure 4.6 Morphologie et analyse élémentaire d'un échantillon de la poussière de verre

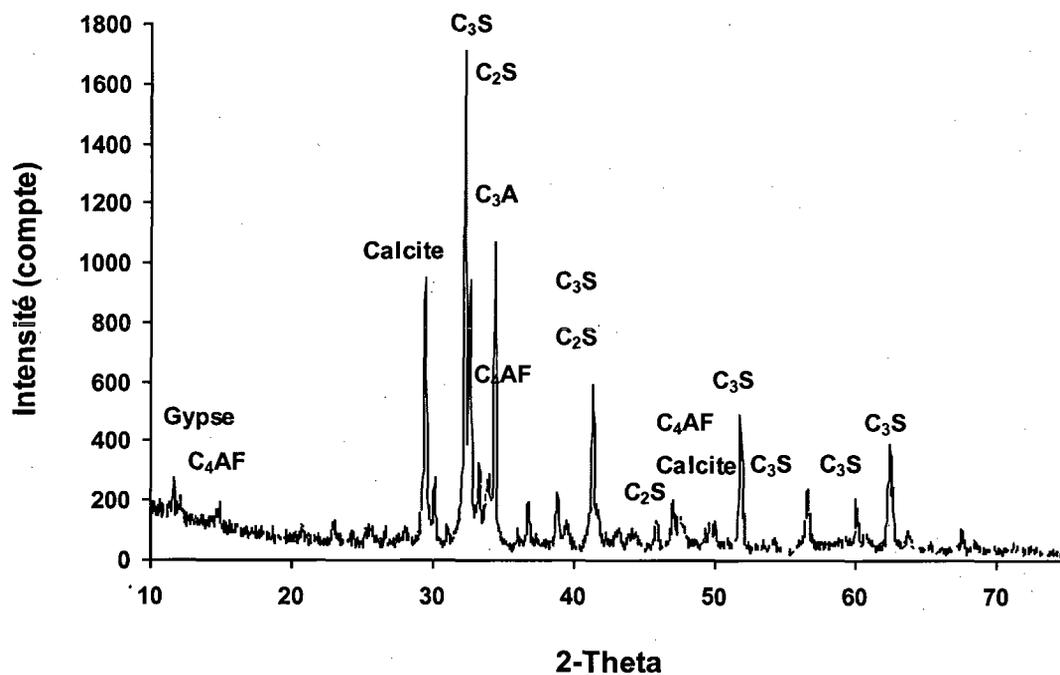


Figure 4.7 Spectre de la DRX du ciment GU

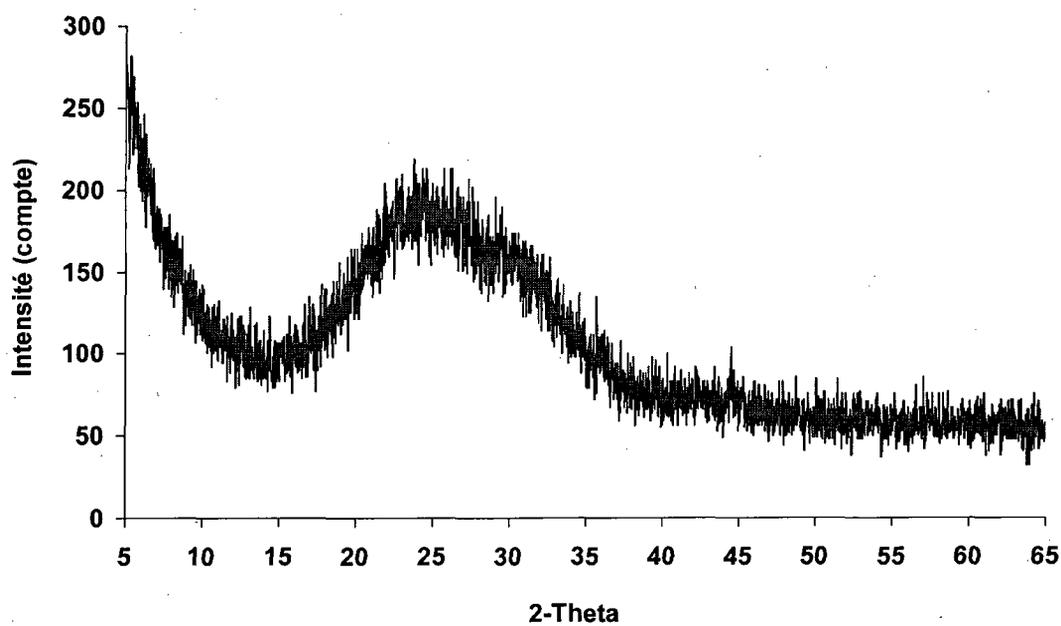


Figure 4.8 Spectre de la DRX de la poudre de verre

4.1.3 Caractéristiques chimiques

La composition chimique a été déterminée par la fluorescence X (XRF) et les résultats sont consignés dans le tableau 4.2. Ces résultats révèlent une forte teneur en silice et aussi en alcalis des poudres de verre. Les pertes au feu des deux stocks de ciments utilisés sont de 0,37 % et 2,35 %. On note une large différence entre ces résultats pour le même type de ciment. La valeur 0,37 % est une valeur assez ambiguë due apparemment au manque d'ajout de filler calcaire dans le ciment. La teneur élevée en silice amorphe de la poudre laisse présager un potentiel pouzzolanique.

TABLEAU 4.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX

Éléments chimiques	Ciment GU 30	Ciment GU 40	Poudre 9×25	Poudre 6×25	Poussière
Bioxyde de silicium (SiO ₂)	20,28	20,62	70,84	70,00	67,40 %
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	5,14	5,28	1,96	2,01	2,18 %
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	2,35	2,75	0,26	0,32	0,67 %
Oxyde de calcium total (CaO)	63,09	63,93	11,97	12,84	11,88 %
Oxyde de magnésium (MgO)	1,79	1,89	0,89	0,93	1,14 %
Trioxyde de soufre (SO ₃)	3,35	3,56	0,17	0,20	0,23 %
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0,91	0,90	0,56	0,60	0,63 %
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	0,14	0,14	12,71	12,51	11,91 %
Chlore (Cl)	0,05	0,02	0,03	0,02	0,07 %
Bioxyde de titane (TiO ₂)	0,11	0,20	0,20	0,16	0,22 %
Pentoxyde de phosphore (P ₂ O ₅)	0,16	0,15	0,02	0,03	0,05 %
Oxyde de strontium (SrO)	0,12	0,10	0,02	0,01	0,03 %
Trioxyde de manganèse (Mn ₂ O ₃)	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00 %
Trioxyde de chrome (Cr ₂ O ₃)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02 %
Oxyde de zinc (ZnO)	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01 %
Perte au feu	2,35	0,37	0,38	0,38	3,61 %
Silicate tricalcique (C ₃ S)	55,28	53,94	-	-	- %
Silicate dicalcique (C ₂ S)	16,44	18,44	-	-	- %
Aluminate tricalcique (C ₃ A)	9,65	9,35	-	-	- %
Ferroaluminate tétracalcique (C ₄ AF)	7,15	8,35	-	-	- %
Oxyde de sodium ou teneur en alcalis (Na ₂ O)éq. = Na ₂ O + 0,658 K ₂ O	0,73	0,73	13,08	12,90	12,69 %

4.2 Pâtes et mortiers

4.2.1 Pâtes

La demande en eau et en superplastifiant des poudres est étudiée sur des coulis par deux essais à savoir le Mini-slump et le Cône Marsh.

a- Mini-affaissement

Le Mini test d'affaissement (Mini-slump) permet d'évaluer l'effet des poudres sur la maniabilité des coulis dans le temps. Les figures 4.9 et 4.10 expriment les résultats du Mini-slump obtenus respectivement sur les poudres 6×25 et 9×25 où il est montré clairement que l'étalement augmente avec le taux de substitution du ciment par la poudre de verre. Ce gain de l'ouvrabilité en présence de la poudre de verre pourrait être expliqué par l'absorption quasiment nulle de la poudre de verre. En comparant les deux figures 4.9 et 4.10, on remarque que pour chaque taux de substitution l'étalement de 6×25 est plus élevé que celui de 9×25. Ceci montre que le gain de l'ouvrabilité observé sur les poudres de verre est inversement proportionnel à leur finesse. La figure 4.11 illustre l'amélioration de la maniabilité des mélanges contenant la poudre de verre dans le temps comparé au témoin. L'amélioration de l'ouvrabilité des mélanges augmente relativement avec l'augmentation du taux de remplacement par la poudre. Les résultats de notre étude confirment des observations antérieures faites par SCHWARZ et coll., 2007.

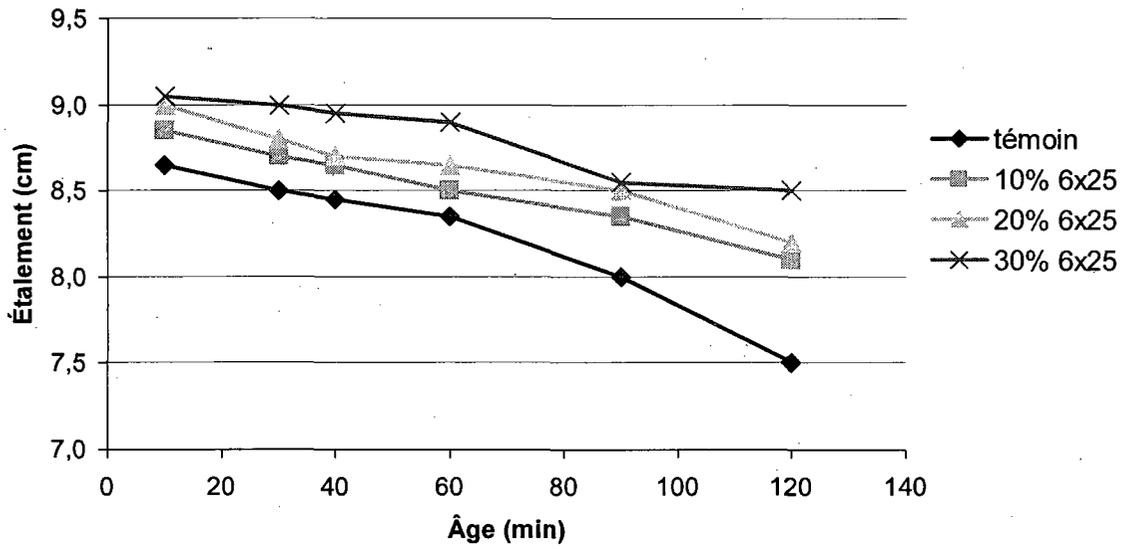


Figure 4.9 Étalement des coulis incorporant la poudre 6x25

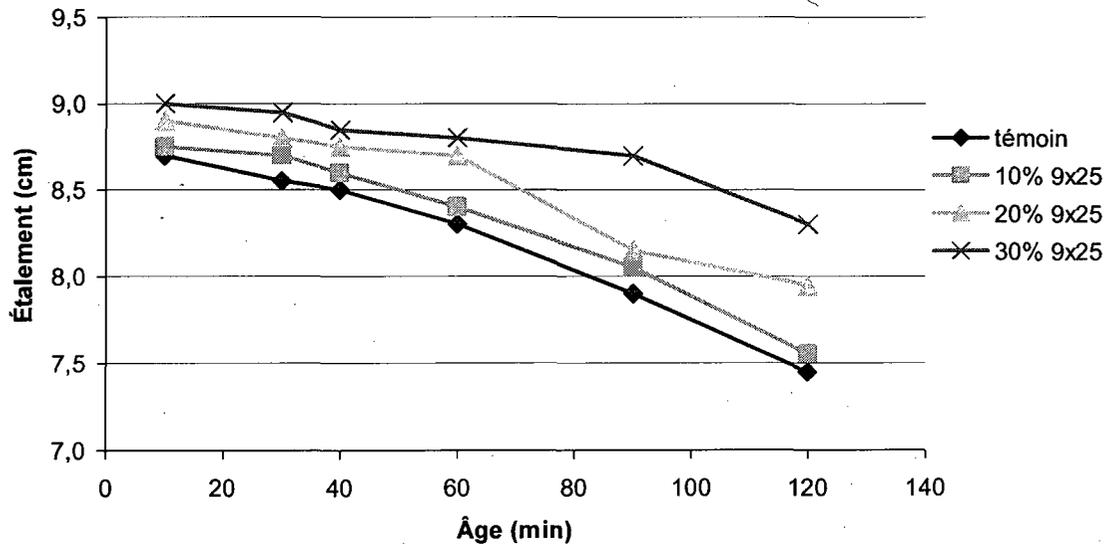


Figure 4.10 Étalement des coulis incorporant la poudre 9x25

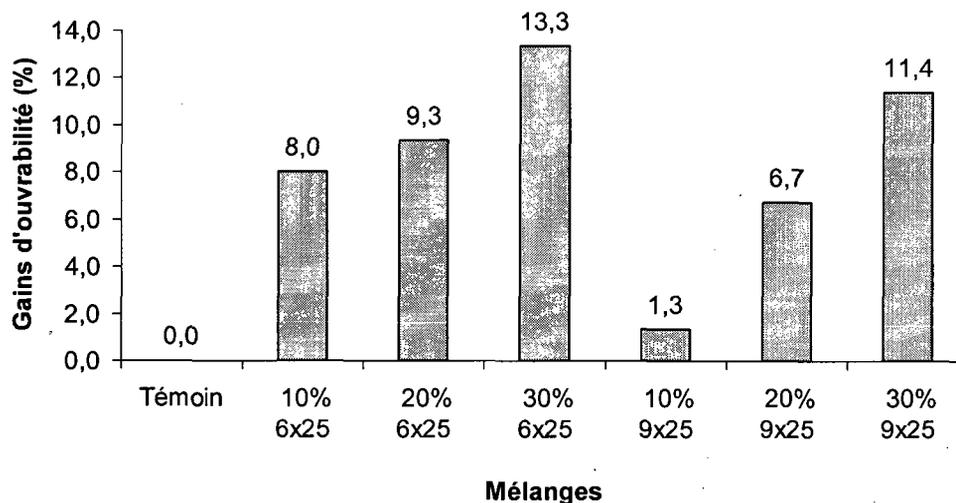


Figure 4.11 Illustration de l'amélioration de l'ouvrabilité après 120 min

b- Cône Marsh

Les résultats obtenus au Cône Marsh sont illustrés par les figures 4.12 à 4.15. Ces figures montrent que le point de saturation avec le superplastifiant utilisé des mélanges incorporant la poudre de verre est approximativement de 1,2 % indépendamment du taux de remplacement et de la finesse. Il est légèrement inférieur à celui du témoin qui est de 1,4 %. La présence de la poudre de verre réduit la demande en superplastifiant confirmant ainsi les résultats obtenus précédemment par l'essai Mini-slump.

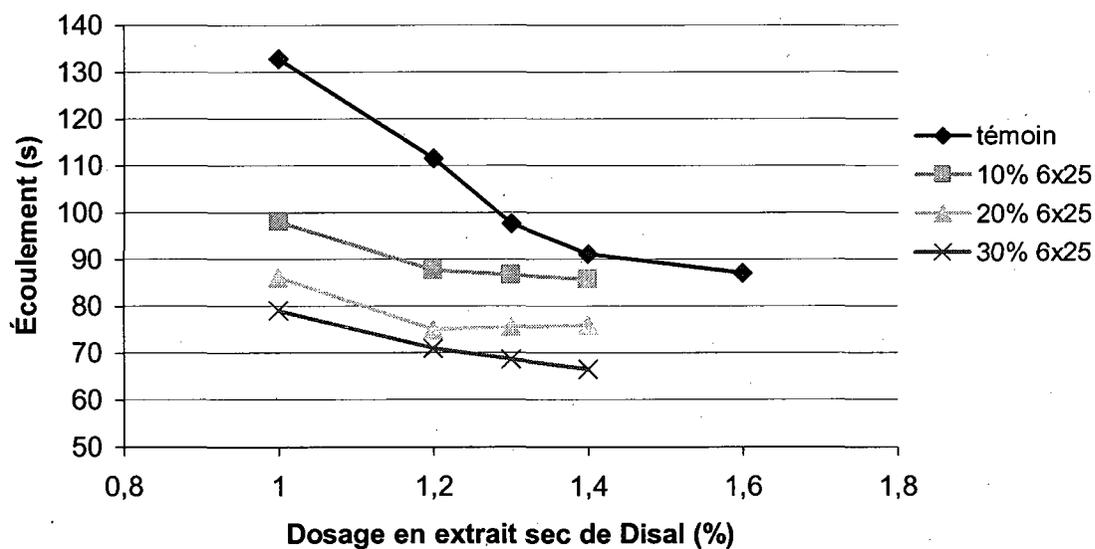


Figure 4.12 Écoulement des mélanges témoin et de 6x25 à 5 min

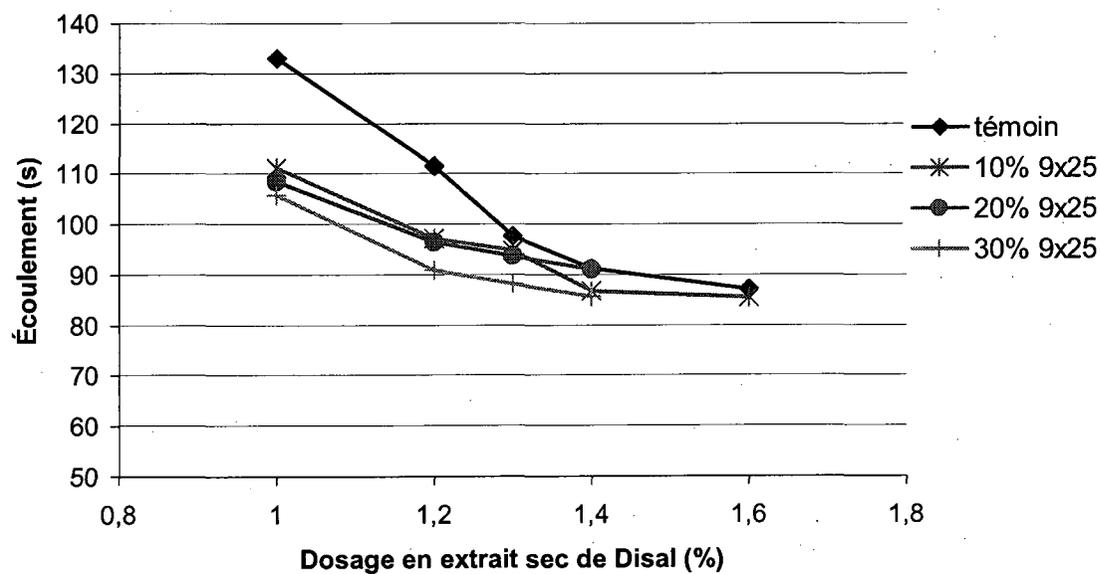


Figure 4.13 Écoulement des mélanges témoin et de 9x25 à 5 min

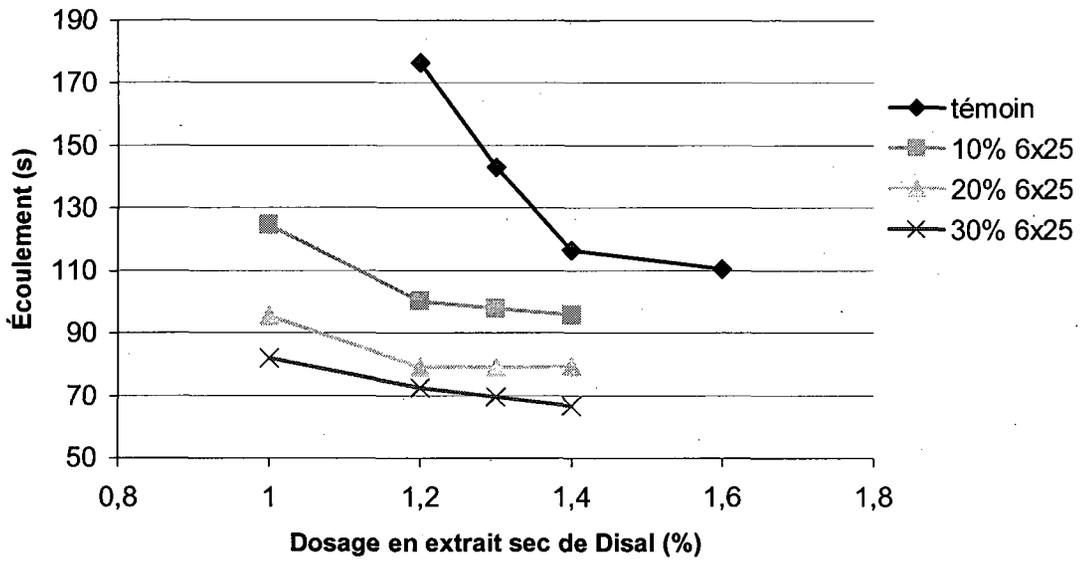


Figure 4.14 Écoulement des mélanges témoin et de 6x25 à 60 min

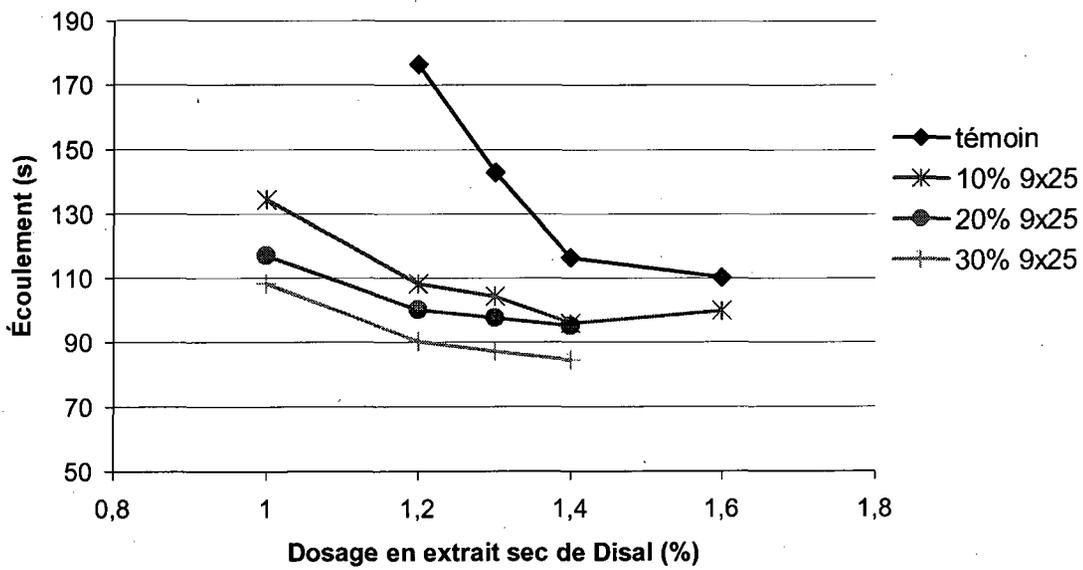


Figure 4.15 Écoulement des mélanges témoin et de 9x25 à 60 min

4.2.2 Mortiers

a- Activités pouzzolaniques

L'activité pouzzolanique des poudres de verre est évaluée sur des cubes de 50 × 50 × 50 mm confectionnés à partir des mélanges de mortiers suivant le procédé décrit dans la norme ASTM C311. Elle est définie par le rapport de la résistance à la compression des mélanges incorporant la poudre de verre à celle du témoin à des échéanciers de 1, 7, 28 et 91 jours d'âge. Les tableaux 4.3 et 4.4 récapitulent respectivement les résultats des résistances à la compression et ceux de l'indice de pouzzolanité des mélanges étudiés.

TABLEAU 4.3 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SUR MORTIERS

Âge (jours)	Résistance à la compression sur des cubes de mortiers (MPa)									
	témoin	10%			20%			30%		
		6×25	9×25	P7	6×25	9×25	P7	6×25	9×25	P7
1	18,9	16,1	16,2	12,6	12,4	13,2	9,0	10,0	11,3	6,6
7	33,0	30,4	30,1	20,6	24,6	24,3	17,1	20,5	22,5	15,0
28	39,8	35,9	37,1	26,3	31,9	33,5	22,0	29,3	31,9	21,1
91	44,9	41,4	46,0	30,6	38,6	43,1	27,3	35,9	43,4	23,7

TABLEAU 4.4 INDICE DE POUZZOLANICITÉ DES POUDRES DE VERRE

Âge (jours)	Indice de pouzzolanicité (%)								
	10%			20%			30%		
	6×25	9×25	P7	6×25	9×25	P7	6×25	9×25	P7
1	85,1	85,6	66,6	65,7	69,5	47,6	52,9	59,4	34,6
7	92,1	91,1	62,4	74,4	73,4	51,7	62,0	68,0	45,4
28	90,4	93,3	66,1	80,3	84,2	55,4	73,6	80,2	53,0
91	92,4	102,5	68,3	86,1	96,1	61,0	79,9	96,8	52,8

Les figures 4.16, 4.17 et 4.18 illustrent l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des échantillons et du taux de substitution par la poudre de verre respectivement pour les poudres 6×25, 9×25 et poussière de verre. Entre 1 et 7 jours, quel que soit le pourcentage de la poudre de verre incorporé, la résistance à la compression des mélanges de 6×25 et 9×25 sont quasi identiques. Entre 28 et 91 jours, les résistances à la compression des mélanges de 9×25 sont supérieures à celles de 6×25 et tentent à égaler celle du témoin à 91 jours. Ces différences observées entre les résistances à la compression des mélanges des deux poudres de verre résultent de l'effet de finesse. Les mélanges de 20 % des poudres 6×25 et 9×25 présentent des indices de pouzzolanicité respectifs de 80 % et 84 % à 28 jours qui sont supérieurs à 75 %, le minimum recommandé par la norme ASTM C618 pour les cendres volantes de classe C ou F et les pouzzolanes naturelles. L'essai de pouzzolanicité des poudres de verre sur des cubes de mortiers est également étudié par SHAYAN et coll., 2004 et SHI et coll., 2005b. En effet, la pouzzolanicité des mélanges avec 20 % de poudre de verre obtenue par SHAYAN et coll., 2004 est de 77 % alors que celle obtenue par SHI et coll., 2005b oscillait entre 80 et 110 % dépendamment de la finesse des poudres de verre. Les résultats de notre étude s'apparentent à ceux observés par ces chercheurs.

La résistance à la compression des mélanges de la poussière de verre sont très faibles par rapport au témoin. Le mélange avec 20 % de la poussière présente un indice de 55 % à 28 jours. Cette valeur est nettement inférieure à 75 %, indiquant que la poussière ne présente pas un potentiel pouzzolanique. Cette poussière est sale et pourvue de débris de toutes sortes et de

déchets de plastiques et de papiers. Elle a été tamisée et triée avant d'être incorporée dans les systèmes cimentaires. Cette poussière a été rejetée et écartée de cette étude pour la suite du projet. Elle a été toutefois utilisée dans l'optimisation des poudres de verre dans le béton pour évaluer ses performances dans le béton afin de confirmer ou d'infirmer la tendance observée sur les cubes de mortiers. Les résultats d'optimisation nous ont donc permis de se prononcer avec certitude sur les faibles performances développées par cette poussière.

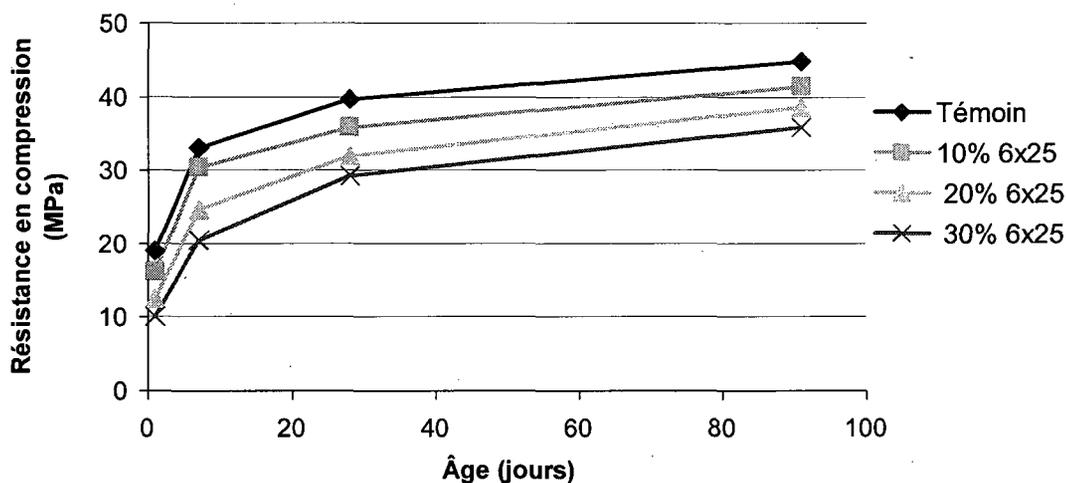


Figure 4.16 Résistance à la compression des mélanges témoin et de poudre 6x25

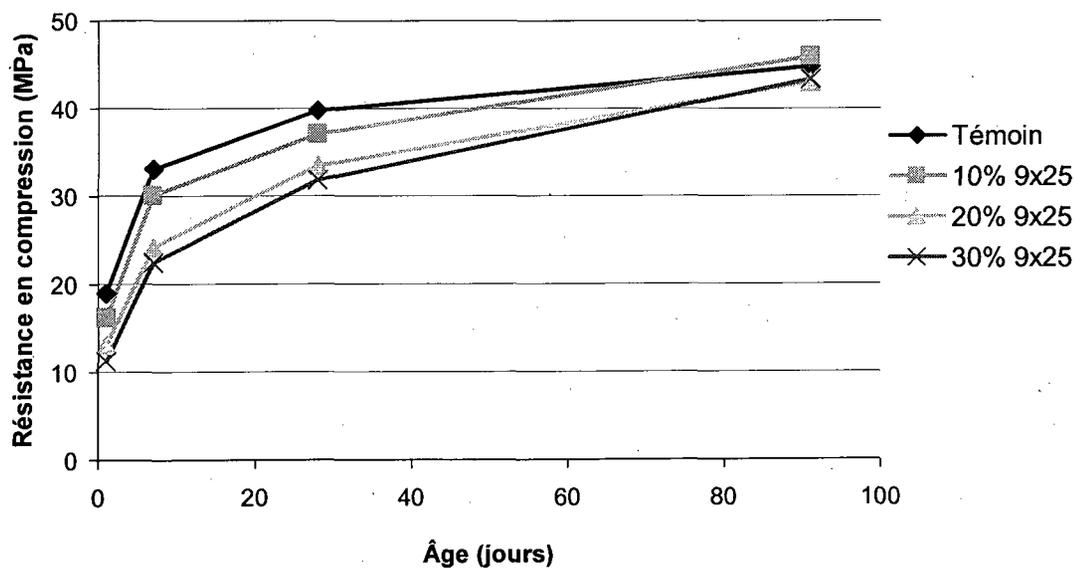


Figure 4.17 Résistance à la compression des mélanges témoin et de poudre 9x25

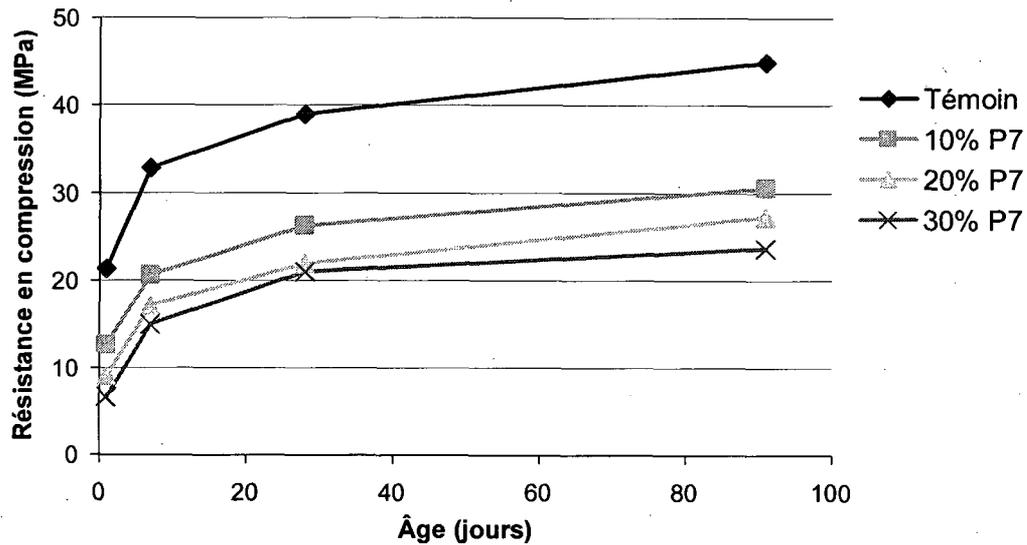


Figure 4.18 Résistance à la compression des mélanges témoin et de poussière

b- Résistance à la réaction alcalis-granulat sur des barres de mortiers

Les résultats de la réaction alcalis granulat sur des barres de mortiers sont présentés sur la figure 4.19. Tous les mélanges incorporant la poudre de verre présentent des expansions inférieures à celles du témoin. Toutefois, même si la poudre réduit l'expansion, elle n'élimine pas complètement la réaction. En augmentant le dosage en poudre de verre à 30 % et à 40 %, une expansion de l'ordre de 0,11 % à 14 jours est obtenue. Cette expansion est à la limite de celle spécifiée par la norme CSA A23.2-28A qui est de 0,10 % à 14 jours. La diminution de l'expansion peut être attribuée à l'effet pouzzolanique de la poudre de verre. La réduction de l'expansion due à la RAG par la poudre de verre a été également observée par SHAYAN et coll. 2004, SHI et coll. 2005a. Il a été également rapporté dans plusieurs travaux que les ajouts cimentaires par leur activité pouzzolanique peuvent réduire l'activité des alcalis dans une matrice cimentaire [HASPARYK et coll., 2000].

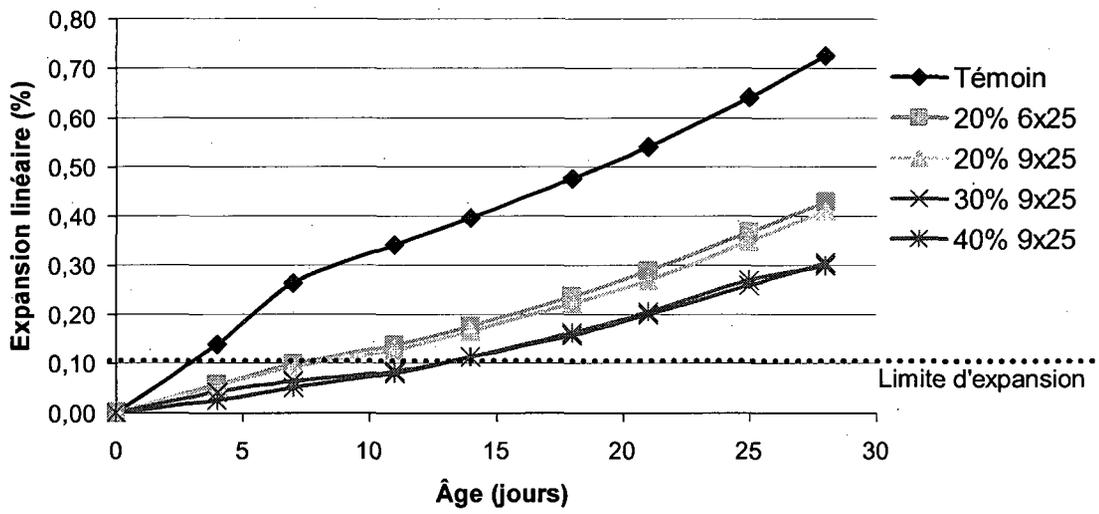


Figure 4.19 Expansion due à la réaction alcalis granulat sur mortiers

4.3 Optimisation des mélanges de bétons

Cette partie de l'étude est réalisée sur des petites gâchées de 25 litres. En moyenne trois gâchées par mélanges de béton ont été confectionnées pour ajuster les paramètres à l'état frais tels que l'affaissement ou l'étalement et la teneur en air. Deux rapports $E/L = 0,55$ et $0,40$ avec trois taux de remplacement 0, 20 et 30 % des poudres de verre broyé 6×25 et 9×25 et la poussière ont été étudiés. Des cylindres de 100×200 mm ont été prélevés pour chaque mélange réussi pour évaluer sa performance mécanique et sa durabilité par la mesure respective de la résistance à la compression et de la pénétrabilité aux ions chlore. Les résultats à l'état frais et durci sont présentés en annexes de ce document.

À la lumière des résultats d'optimisation, on remarque une amélioration de l'ouvrabilité, de la résistance à la compression à long terme (≥ 28 jours) et de la durabilité des mélanges de béton en présence de la poudre de verre. Les résistances à la compression des mélanges avec des poudres de verre sont inférieures à celles du témoin à jeune âge mais les rattrapent entre 28 et 56 jours pour le rapport $E/L = 0,55$ et au voisinage de 91 jours pour le rapport $E/L = 0,40$. Une différence non significative peut être observée entre les compressions de 20 % et 30 % de 6×25 ou 9×25 pour chacun des deux rapports E/L étudiés. Il en est de même pour les charges totales de l'essai de pénétrabilité aux ions chlore. Ces observations ont permis de retenir 20 % et 30 % des deux poudres 6×25 et 9×25 , pour la suite du projet.

La poussière de verre entraîne de l'air pour $E/L = 0,55$ sans addition d'un agent entraîneur d'air. Par contre pour $E/L = 0,40$, il était difficile d'entraîner de l'air même en présence de différents types d'agent entraîneur d'air. Aussi, la poussière réduit l'ouvrabilité du béton, en augmentant le dosage en superplastifiant d'environ 80 % et 140 % respectivement dans les mélanges avec 20 % et 30 %. Les résistances à la compression des mélanges contenant la poussière sont faibles par rapport à celles du témoin à tous les âges. De plus elle augmente considérablement la pénétrabilité des ions chlorures d'environ 70 % à 28 jours. Cette tendance confirme celle observée sur des cubes de mortiers où la poussière présentait un indice de pouzzolanité très faible. Ces résultats montrent l'inefficacité ou mieux la faible performance de cette poussière due aux impuretés qu'elle contenait et par conséquent elle est écartée des matériaux d'étude pour la suite du projet.

4.4 Bétons conventionnels

Une fois que les dosages en adjuvants chimiques sont connus, de grosses gâchées d'environ 100 litres de volume sont confectionnées pour l'échantillonnage. Des cylindres de 100 × 200 mm, des prismes de 75 × 75 × 285 mm et de 100 × 100 × 400 mm et des plaques de 250 × 250 × 75 mm ont été échantillonnés pour les différents essais. La composition des mélanges des bétons conventionnels est présentée par le tableau 4.5.

TABLEAU 4.5 MÉLANGES DES BÉTONS CONVENTIONNELS

Matériaux	Composition par m ³ du béton ordinaire E/L=0,55				
	témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25	
		20%	30%	20%	30%
Airex-L (ml/100kg du liant)	65	45,7	40	45,7	40
Ciment (kg)	350	280	245	280	245
Poudre (kg)	-	70	105	70	105
Granulat fin (sable) 5 mm (kg)	660	643	636	643	636
Gros granulat 20 mm (kg)	1070	1070	1070	1070	1070

4.4.1 Paramètres d'ouvrabilité

Les demandes en agent entraîneur d'air (AEA) dans les mélanges contenant 20 % et 30 % des poudres de verre sont respectivement inférieures d'environ 20 et 25 ml/100 kg de ciment à celle du témoin. L'affaissement mesuré à 10 min dans les mélanges avec poudres de verre est d'au moins 8 % supérieur à celui du témoin. Ceci traduit une amélioration de l'ouvrabilité des mélanges en présence de la poudre de verre. La perte d'affaissement au bout de 30 min est de 10 mm soit 6 % pour le témoin et de 5 mm soit environ 2,5 % pour les mélanges incorporant les poudres de verre. Ces pertes d'affaissement ne sont significatives en raison de marge d'erreur admise sur cette mesure. Les masses volumiques des mélanges sont comprises entre 2225 et 2250 kg/m³. Leur variation au bout de 30 min pour chaque mélange est négligeable.

SHAYAN et coll., 2006 ayant étudié des mélanges de rapport E/L = 0,49 avec 20 % de poudre de verre de finesse 800 m²/kg avaient observé une réduction d'affaissement de 7,1 % comparativement au témoin. Toutefois dans une autre étude menée par TAHA et coll., 2008a, un affaissement similaire entre le béton témoin et un mélange avec 20 % de poudre de verre et de rapport E/L = 0,38 a été observé.

TABLEAU 4.6 PROPRIÉTÉS À L'ÉTAT FRAIS DES BÉTONS CONVENTIONNELS

Grandeurs mesurées	Témoin		Poudre 6×25				Poudre 9×25			
			20%		30%		20%		30%	
	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	30 min
AEA : Airex-L (ml/100kg)	65		45,7		40		45,7		40	
Air (%)	6,9	6,8	6,4	6,2	6,1	5,8	6,8	6,3	5,5	5,5
Affaissement (mm)	180	170	195	195	200	195	205	200	200	200
Masse volumique (kg/m ³)	2226	2226	2250	2218	2246	2249	2247	2246	2254	2246
Température (°C)	21,2	21,4	20,0	20,2	19,8	20,1	18,4	18,6	17,6	17,8

4.4.2 Temps de prise

Les temps de prise des différents mélanges étudiés sont illustrés sur la figure 4.20. Les temps de début et fin de prise des mélanges incorporant les poudres de verre sont tous légèrement supérieurs à celui du témoin. Les durées de prise des mélanges incorporant la poudre de verre, exprimées par la différence entre la fin et le début de prise, sont légèrement supérieures en moyenne de 22 minutes soit 22 % à celui du témoin. La poudre de verre comme d'autres ajouts cimentaires tels que les cendres volantes et le laitier semble retarder légèrement la prise.

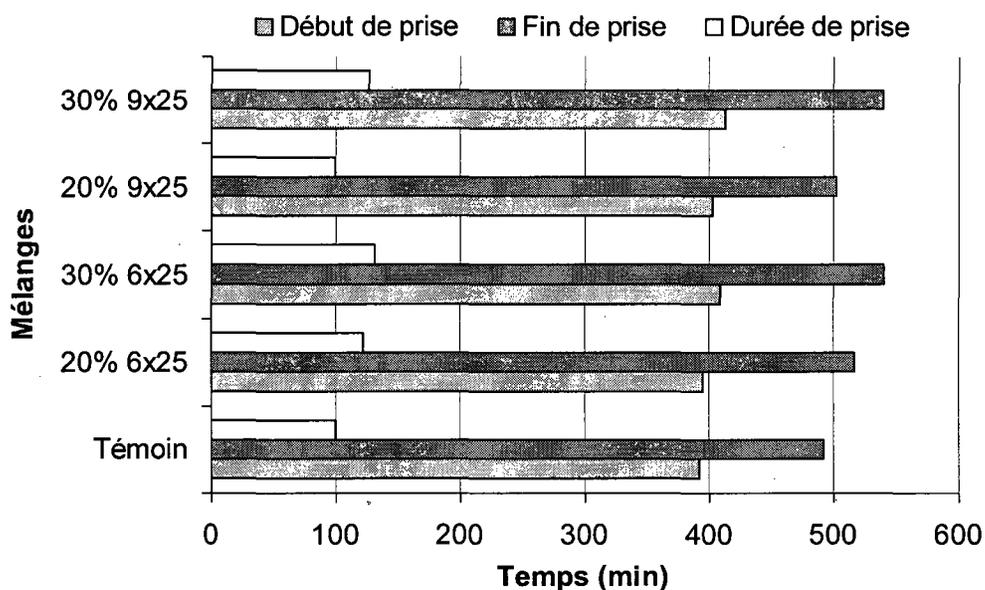


Figure 4.20 Temps de prise des bétons conventionnels

4.4.3 Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression sont consignés dans le tableau 4.7 et illustrés par les figures 4.21 et 4.22. La figure 4.21 illustre la variation de la compression des mélanges en fonction de l'âge tandis que la figure 4.22 montre le développement de gain de résistance de chaque mélange. Entre 1 et 28 jours, la résistance à la compression des mélanges incorporant les poudres de verre sont inférieures à celle du témoin. À 28 jours les résistances à la compression des mélanges contenant 20 % et 30 % des poudres de verre 6×25 ou 9×25 représentent respectivement 85 % et 87 % de celle du témoin. Ces valeurs sont supérieures à la limite inférieure de 75 %, fixée par la norme CSA A3004-E1, pour les ajouts cimentaires. Entre 28 et 91 jours, le taux de développement de résistance du témoin est de 5 % et ceux des mélanges incorporant les poudres de verre sont compris entre 8 et 12 %. À 91 jours les mélanges contenant les poudres de verre développent de résistance variant de 94 à 103 % de celle du témoin.

La figure 4.22 montre que les gains de résistance à 7 jours des mélanges avec les poudres de verre sont inférieurs à celui du témoin tandis qu'ils sont similaires à ce dernier à 28

jours et le dépassent à 91 jours, ce qui renseigne sur la réactivité lente de la poudre de verre à jeune âge, mais assez développée à moyen et à long termes. De plus à 91 jours, les mélanges contenant 30 % de poudre de verre présentent des gains de résistance supérieurs d'au moins 18 % à ceux des mélanges avec 20 % de poudre de verre et du témoin. Les mélanges incorporant 30 % de poudre de verre reflètent un meilleur développement de résistance que ceux contenant 20 %.

Le développement des résistances faibles à jeune âge mais important à long termes qui se dégage des résultats de notre étude a été également observé par SHAYAN et coll., 2004 et 2006, TAHA et coll., 2008 et SCHWARZ et coll., 2007 et 2008b.

TABLEAU 4.7 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS CONVENTIONNELLS

Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)				
	Témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25	
		20%	30%	20%	30%
1	10,4	7,6	5,9	7,8	6,0
7	20,2	15,6	14,5	16,8	14,7
28	25,2	21,7	21,0	22,0	21,8
91	28,3	26,6	27,0	27,3	29,1

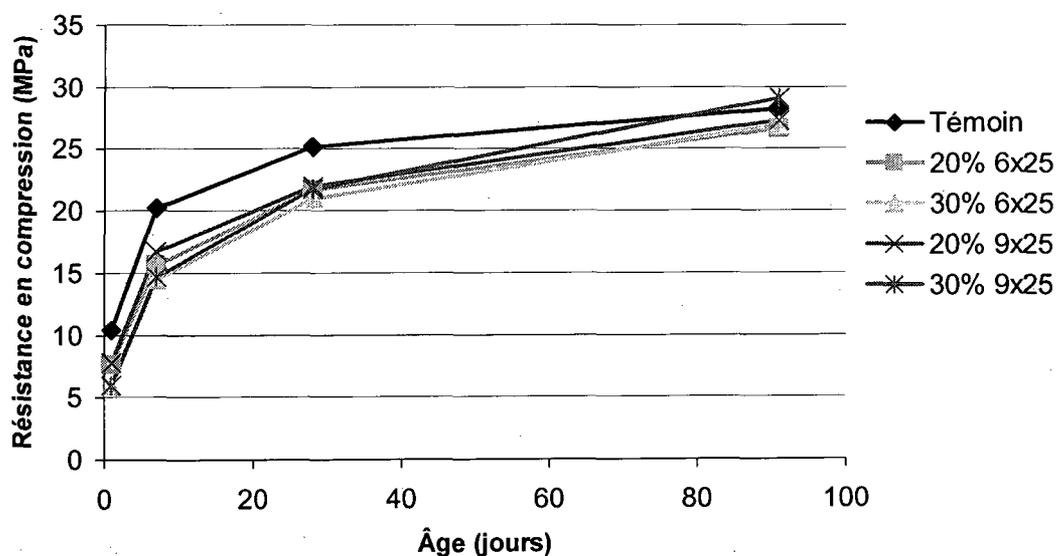


Figure 4.21 Résistance à la compression des bétons conventionnels

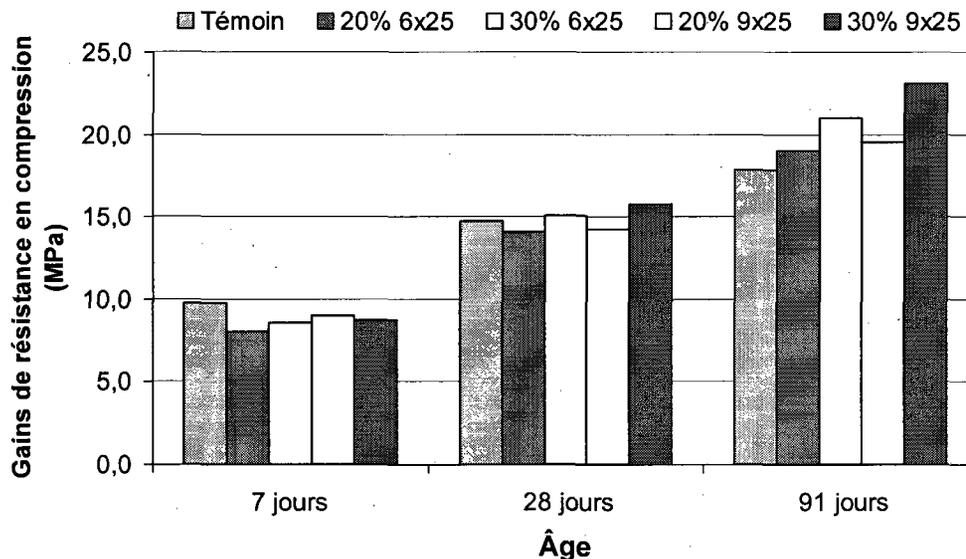


Figure 4.22 Gains de résistance à la compression des bétons conventionnels

4.4.4 Résistance en traction par fendage

Les résistances en traction par fendage des mélanges sont présentées sur la figure 4.23. Les résistances en traction de tous les mélanges de poudres de verre, obtenues à 28 ou 91 jours, dépassent celles du témoin. Cette observation illustre une amélioration de la résistance en traction des bétons en présence des poudres de verre. On remarque aussi que les résultats obtenus à 28 jours pour des mélanges avec 20 % et 30 % des poudres de verre sont similaires mais à 91 jours les résistances à la traction des mélanges avec 30 % des poudres dépassent celles des mélanges avec 20 % des poudres d'environ 11 % et 16 % respectivement pour les poudres 6x25 et 9x25 et 27 % comparativement au témoin. Ceci démontre une meilleure amélioration de la résistance à la traction avec 30 % de substitution par la poudre de verre par rapport à 20 %. Toutefois, des études conduites par SHAYAN et coll., 2006 sur des mélanges de béton de rapport E/L = 0,49, révèlent une légère réduction des résistances en traction en fonction du taux de substitution par la poudre de verre. Parmi plusieurs formules empiriques

telles que $f_t = 0,6\lambda\sqrt{f_c}$ [CSA], $f_t = 0,6 + 0,06f_c$ [BAEL], $f_t = 0,273f_c^{2/3}$ [Comité Euro-International du béton CEB-FIT, 1978], $f_t = 0,59 * f_c^{0,55}$ [ACI] permettant d'estimer les résistances à la traction à partir de la compression, la relation $f_t = 0,273f_c^{2/3}$ donne une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux de la compression et de la traction de notre étude. Sur la figure 4.23, les valeurs réelles sont les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques sont celles estimées par la formule $f_t = 0,273f_c^{2/3}$. On remarquera que le mélange témoin présente des résistances en traction similaires à celles prédites par cette relation par contre les mélanges incorporant la poudre de verre présentent des résistances en traction bien au-delà des valeurs estimées par cette relation.

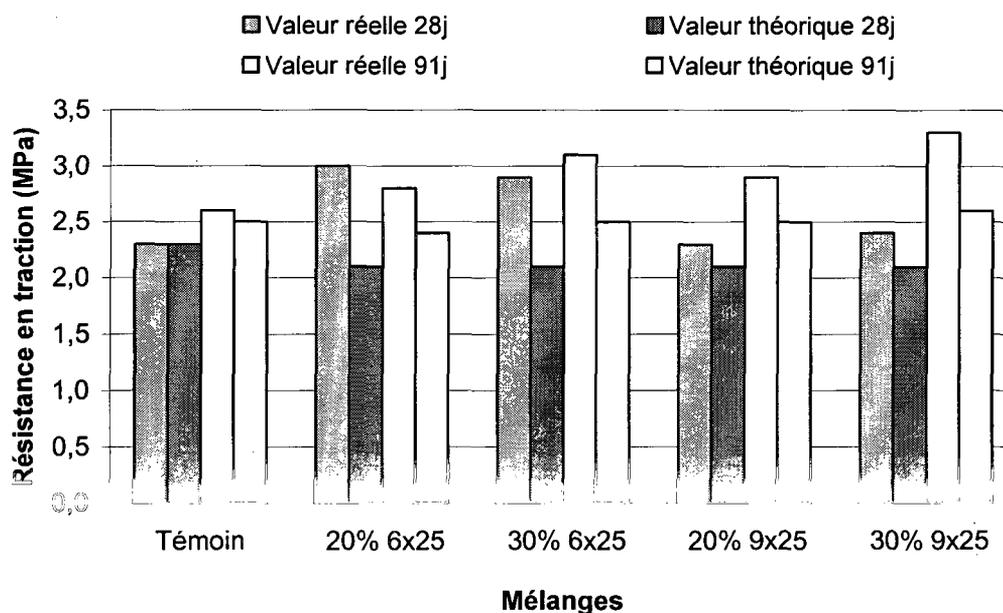


Figure 4.23 Résistance en traction par fendage des bétons conventionnels

4.4.5 Résistance en flexion

La résistance en flexion à 28 jours de chaque mélange est présentée sur la figure 4.24. Elle montre que les mélanges incorporant la poudre de verre développent des résistances en

flexion similaires à celle du témoin. Les mêmes résultats ont été également observés par SHAYAN et coll., 2006 sur des mélanges de rapport E/L = 0,49.

Les résultats de la flexion sont bien corrélés avec ceux de la compression par la relation $f_l = 0,94f_c^{0,5}$ [ACI 363-84]. Les valeurs théoriques obtenues par cette relation illustrées sur la figure 4.24 sont similaires aux résultats expérimentaux pour tous les mélanges.

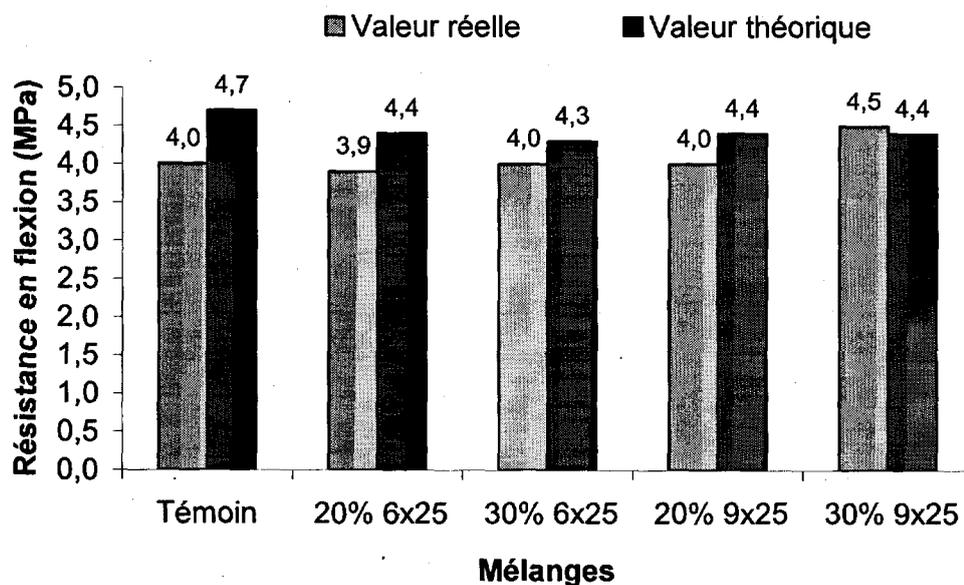


Figure 4.24 Résistance en flexion des bétons conventionnels

4.4.6 Module d'élasticité

Les modules d'élasticité sont présentés par la figure 4.25. Pour les deux échéanciers retenus (28 jours et 91 jours), les modules d'élasticité des mélanges incorporant les poudres de verre sont similaires à ceux du témoin, sauf le mélange de 30 % de la poudre de verre 9x25 qui présente des modules supérieurs d'au moins 7 % à ceux du témoin.

SHAYAN et coll., 2006 ont observé une légère diminution du module d'élasticité des mélanges en fonction du taux de substitution par la poudre de verre comparativement au témoin.

Les formules empiriques suivantes $E_c = (3,3 * \sqrt{f_c} + 6,9) * (\frac{d}{2300})^{1,5}$ [CAN3-CSA23.3-M94], $E_c = 11 * f_c^{1/3}$ [BAEL], $E_c = 9 f_c^{1/3}$ [Code Européen 90-95], $E_c = 5 * \sqrt{f_c}$ [CAN A23.3-M84], avec f_c en MPa et E_c en GPa, permettent de prédire le module d'élasticité à partir des résistances à la compression. Parmi ces multitudes relations permettant de prédire le module d'élasticité à partir des résistances à la compression, la relation $E_c = 9 f_c^{1/3}$ [Code Européen, 90-95], présente une meilleure corrélation entre nos résultats du module d'élasticité et de la résistance à la compression. Les valeurs théoriques obtenues par cette relation sont aussi illustrées sur la figure 4.25.

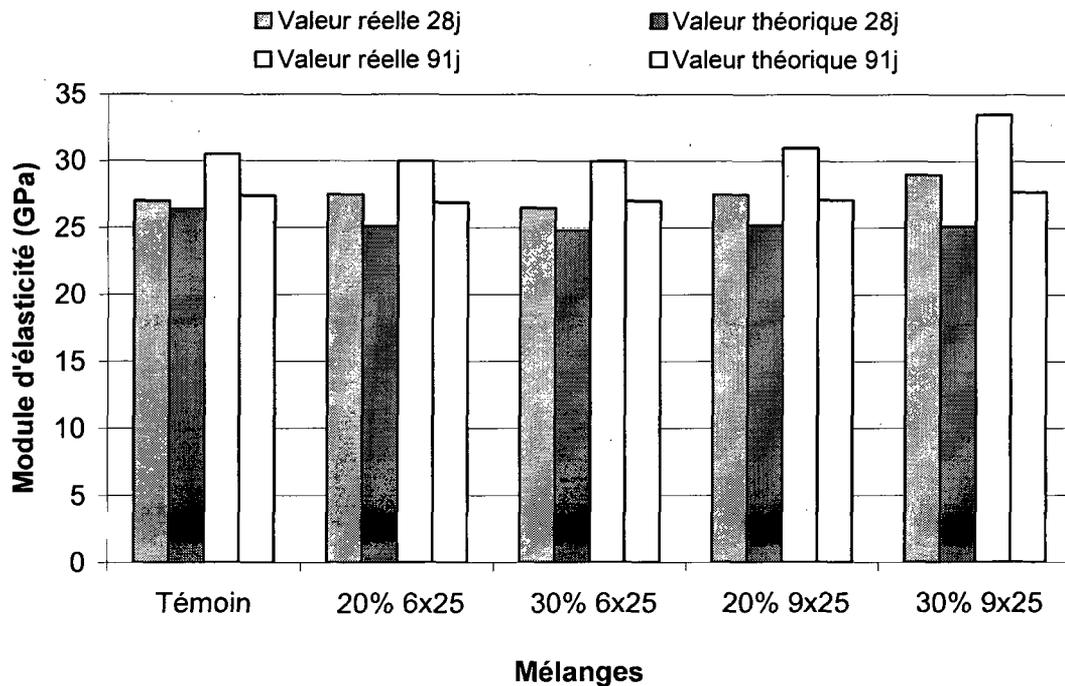


Figure 4.25 Modules d'élasticité des bétons conventionnels

4.4.7 Caractéristiques du réseau d'air dans le béton durci

Les résultats des caractéristiques du réseau d'air dans les bétons durcis $E/L = 0,55$ sont présentés dans le tableau 4.8 et schématisés sur les figures 4.26 et 4.27. La perte d'air à l'état durci varie de 0,7 % à 1,9 % pour tous les mélanges. Le facteur d'espacement de chaque mélange est inférieur à 230 μm qui est la limite maximale spécifiée dans la norme CSA A23.1 pour un béton avec E/L supérieur à 0,36 exposé au gel-dégel avec ou sans sels déglacants. La surface spécifique des bulles est supérieure à 25 mm^{-1} . Ces résultats indiquent que les mélanges présentent de bonnes caractéristiques du réseau d'air pour résister au gel-dégel, selon la norme ASTM C457.

TABLEAU 4.8 CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU DE BULLES D'AIR DES BÉTONS $E/L = 0,55$

caractéristiques	Mélanges				
	Témoin	20% 6×25	30% 6×25	20% 9×25	30% 9×25
Volume d'air, état frais (%)	6,8	6,2	5,8	6,3	5,5
Volume d'air, état durci (%)	5,3	4,5	5,1	4,4	3,9
Surface spécifique (1/mm)	27,4	27,0	25,0	25,1	25,5
Facteur d'espacement \bar{L} (μm)	179	201	210	216	217

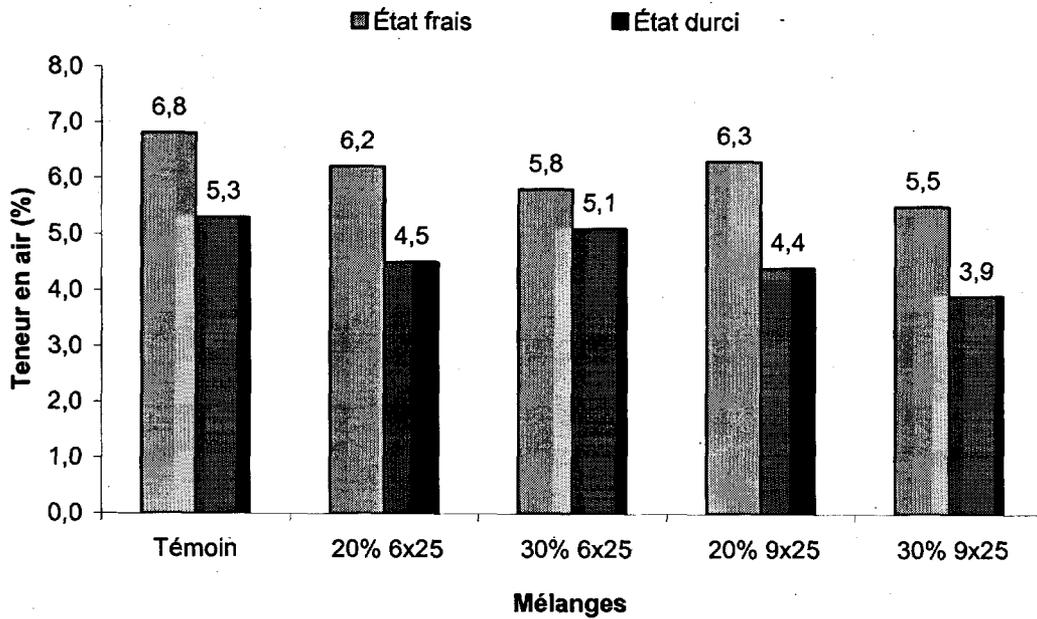


Figure 4.26 Comparaison de la teneur en air à l'état frais et durci des bétons E/L = 0,55

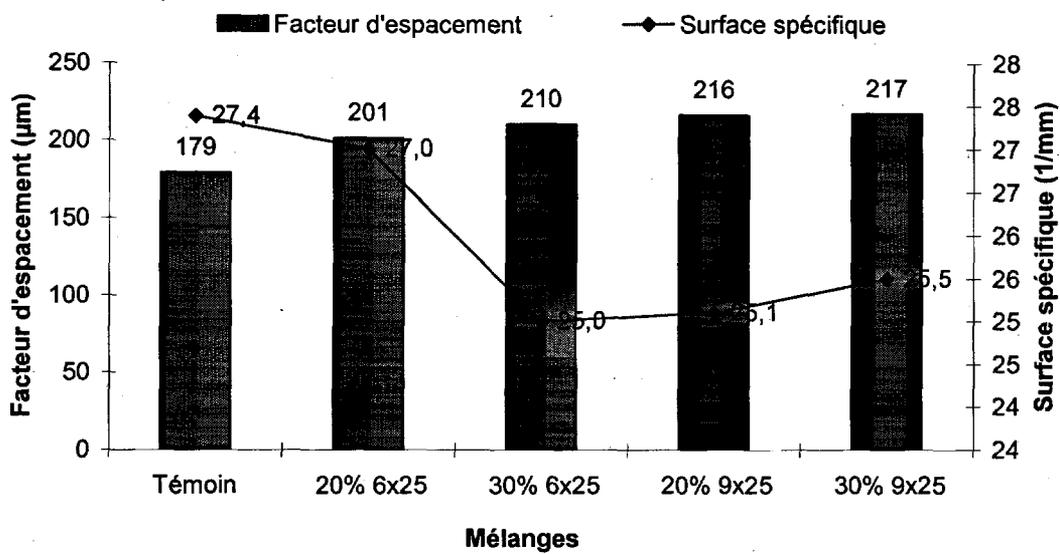


Figure 4.27 Facteur d'espacement et surface spécifique des bulles d'air dans les bétons conventionnels

4.4.8 Durabilité aux cycles de gel-dégel rapides

L'aspect visuel des échantillons après 300 cycles de gel-dégel, figure 4.28, illustre un état des surfaces finement fissurées des échantillons des mélanges avec poudres de verre similaire à celui du témoin. Les facteurs de durabilité des mélanges présentés sur la figure 4.29 sont largement supérieurs à 60 %, le minimum recommandé par la norme ASTM C666. Tous les bétons ont présenté une très bonne durabilité au gel-dégel. La durabilité au gel-dégel est liée aux caractéristiques du réseau d'air dans le béton. On doit noter que, pour un béton exposé à des conditions de gel-dégel, la norme ACI 318-89 (révisée en 1992) limite la teneur, en masse, de cendres volantes et autres pouzzolanes à 25 % de la masse des liants [ACI 318-95]. Un béton contenant du laitier dans des proportions correctes présente la même résistance au gel dégel qu'un béton fabriqué uniquement avec du ciment Portland. Cependant, la présence du laitier dans un béton à air entraîné n'a pas d'effet bénéfique [ACI 226.1R-87, DUBOVOY et coll., 1986].

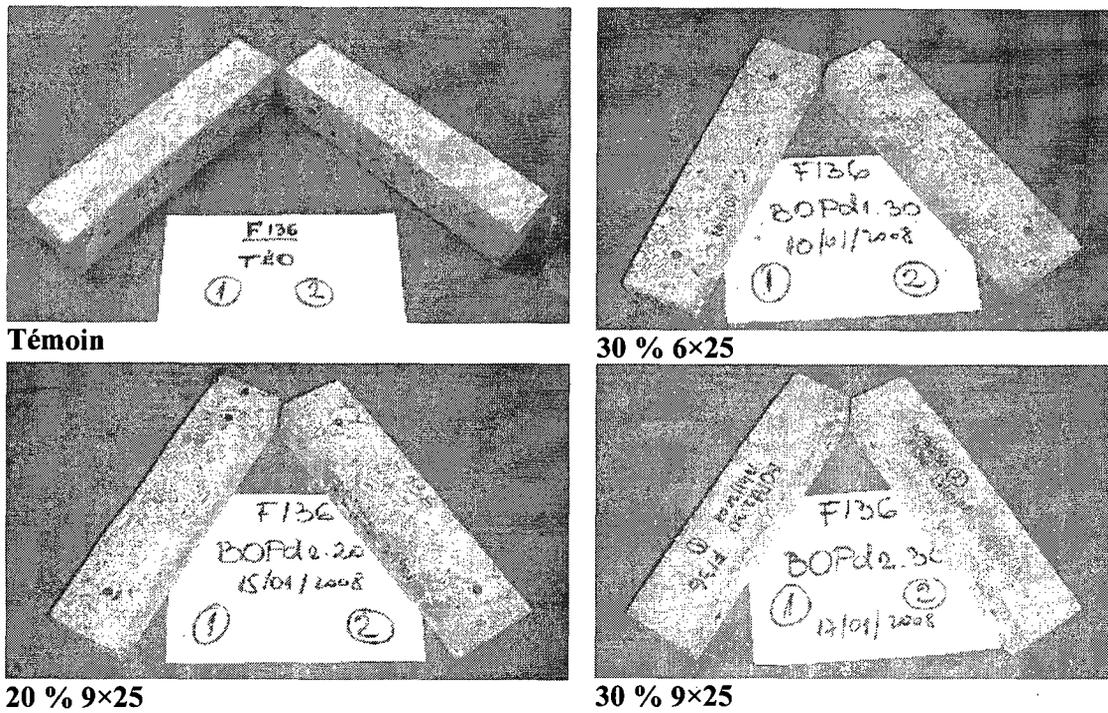


Figure 4.28 Aspects physiques des prismes des bétons conventionnels après les 300 cycles de gel dégel

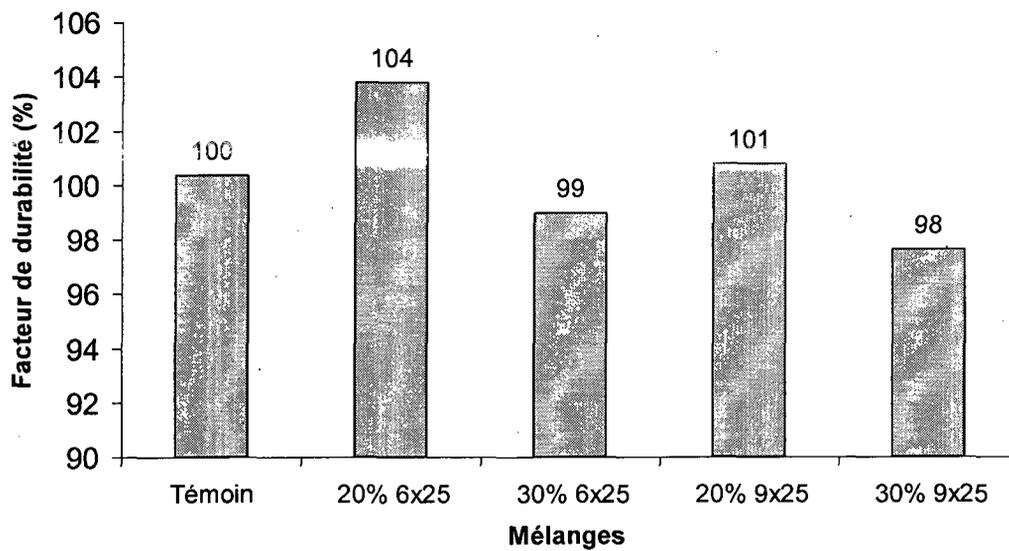


Figure 4.29 Facteur de durabilité au gel-dégel des bétons conventionnels

4.4.9 Résistance à l'écaillage

Les résistances à l'écaillage des mélanges sont évaluées quantitativement par la mesure de la perte de masse et qualitativement par une évaluation visuelle de l'état caractéristique de la surface écaillée des échantillons. Les résultats obtenus sur les échantillons exposés à l'écaillage à partir de 28 jours sont présentés dans le tableau 4.9 tandis que ceux pour les échantillons exposés à l'écaillage à 91 jours sont présentés dans le tableau 4.10. Les pertes de masses après 56 cycles de gel-dégel obtenus sur les échantillons exposés à l'écaillage à partir de 28 jours des mélanges contenant 20 et 30 % de 6×25 sont respectivement de 800 et 933 g/m². Ces pertes sont supérieures d'environ 300 à 430 g/m² à la limite maximale de 500 g/m² spécifiée par la norme BNQ. Par contre celles du témoin et des mélanges avec poudre de verre 9×25 demeurent inférieures à la limite maximale de 500 g/m² après 56 cycles. Après 56 cycles de gel dégel, l'évaluation visuelle des surfaces écaillées, figure 4.30, montre que le mélange témoin et ceux contenant la poudre de verre 9×25 présentent une surface écaillée avec absence de cratères, d'où l'attribution de la côte caractéristique 1b, tandis que les mélanges incorporant la poudre de verre 6×25, présentent des surfaces écaillées avec présence de quelques cratères, correspondant à la côte caractéristique 2a, établie par la norme BNQ 2621-900.

La perte de masse après 56 cycles de gel dégel des échantillons du mélange témoin exposés à l'écaillage à partir de 91 jours est de 197 g/m². Il est à remarquer que le mélange contenant 30 % de la poudre de verre 6×25 présente une perte très importante après 56 cycles de 1845 g/m². Les autres mélanges contenant la poudre de verre 9×25 ont présenté des pertes variant 776 à 961 g/m². Les pertes de masse à l'écaillage des mélanges exposés à l'écaillage à 91 jours sont significativement supérieures que celles des mêmes mélanges exposés à l'écaillage à 28 jours. Ces pertes importantes observées à 91 jours comparativement à celles observées à 28 jours, ne peut trouver une explication plausible à ce stade de l'étude. Néanmoins, si l'erreur de manipulation par l'opérateur lors de l'échantillonnage ou au cours de l'essai même, n'est pas mise en cause, cette tendance pourrait probablement être liée aux caractéristiques physiques de la surface telles que la porosité, pénétrabilité et la microfissuration et aussi au degré de saturation. En effet, un degré de saturation élevé (près de la surface) favorise évidemment la formation d'une plus grande quantité de glace. Ces

résultats laissent supposer que les surfaces des plaques sont plus saturées à 91 jours qu'à 28 jours avant l'application des cycles de gel dégel en présence de sel fondant. De plus le degré de saturation élevé occasionne une dilution de la concentration de la solution en ion contenue dans les pores. Or, les concentrations en sels de déglacage les plus faibles sont les plus dommageables car elles abaissent moins le point de fusion de la glace lors du gel. Ce concept de degré de saturation de la surface plus élevé à 91 jours qu'à 28 jours reste une hypothèse qui mérite d'être confirmée ou infirmée par des études ultérieures. Il serait alors idéal de faire d'autres analyses pour déterminer la cause exacte de ce phénomène.

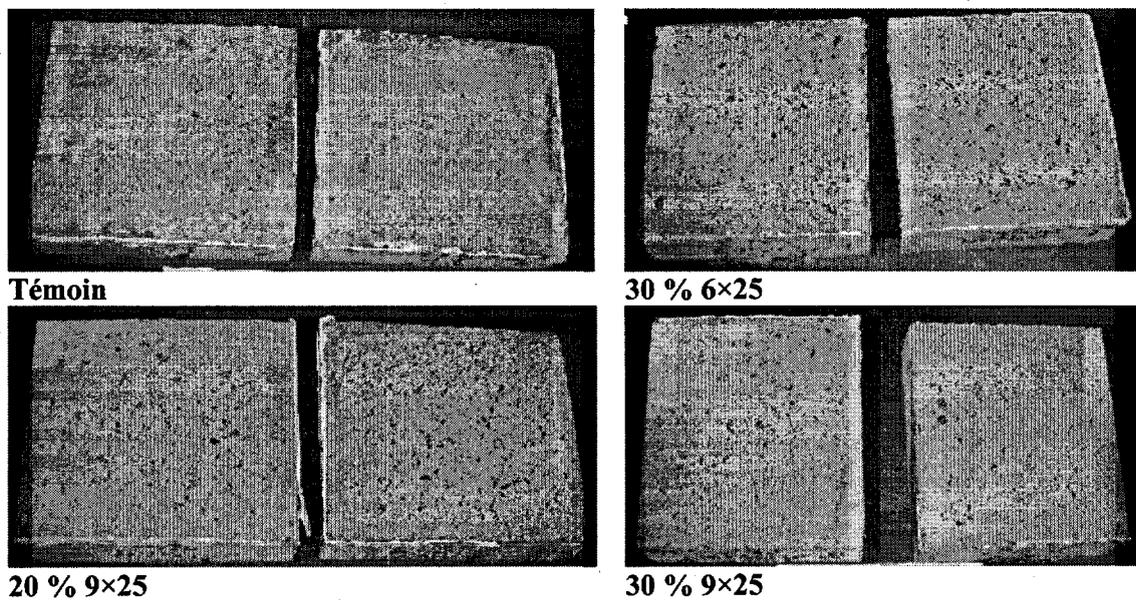


Figure 4.30 Aspects physiques des plaques des bétons conventionnels après l'écaillage à 56 cycles de gel dégel en présence de sel fondant à partir de 28 jours d'âge

TABLEAU 4.9 RÉSISTANCE DES BÉTONS E/L = 0,55 EXPOSÉS À L'ÉCAILLAGE À 28 JOURS D'ÂGE

Nombre de cycle	Perte de masse g/m ²									
	Témoin		20% 6×25		30% 6×25		20% 9×25		30% 9×25	
	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	63	1a	524	2a	547	2a	262	1b	175	1b
21	122	1b	694	2a	713	2a	370	1b	238	1b
35	141	1b	757	2a	797	2a	435	1b	292	1b
56	186	1b	800	2a	933	2a	491	1b	395	1b

TABLEAU 4.10 RÉSISTANCE DES BÉTONS E/L = 0,55 EXPOSÉS À L'ÉCAILLAGE À 91 JOURS D'ÂGE

Nombre de cycle	Perte de masse g/m ²									
	Témoin		20% 6×25		30% 6×25		20% 9×25		30% 9×25	
	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	152	1b	581	1b	741	2a	481	2a	572	2a
21	192	1b	691	1b	920	2a	508	2a	610	2a
35	195	1b	798	1b	1805	2b	764	2a	935	2a
56	197	1b	819	1b	1845	2b	776	2a	961	2a

4.4.10 Pénétrabilité des ions chlorures

Les pénétrabilités des mélanges contenant la poudre de verre, exprimées par la diffusion des ions chlorures (figure 4.31), sont plus faibles que celles du témoin. À 28 jours, les mélanges avec 20 % de 6×25 et 20 % de 9×25 présentent des pénétrabilités de l'ordre de

0,89 et 0,69 fois celle du témoin respectivement. Celles des mélanges avec 30 % de 6×25 et 30 % de 9×25 sont respectivement de l'ordre de 0,52 et 0,50 fois celle du témoin, indiquant ainsi que, plus le taux de remplacement augmente, plus le béton est imperméable.

À 91 jours, les mélanges avec 20 % des poudres de verre 6×25 et 9×25 présentent des pénétrabilités de l'ordre de 0,33 et 0,27 fois celle du témoin respectivement, alors que pour les mélanges avec 30 % des poudres de verre 6×25 et 9×25, les pénétrabilités descendent respectivement à 0,22 et 0,20 fois celle du témoin. À 28 jours et selon la norme ASTM C1202, les mélanges témoin et ceux incorporant 20 % de poudre de verre présentent une pénétrabilité élevée, alors que celle des mélanges contenant 30 % de poudre de verre est modérée. Par contre à 91 jours, la pénétrabilité des ions chlorures du témoin demeure élevée mais celles de tous les mélanges incorporant les poudres de verre sont faibles ou très faibles, illustrant ainsi une bonne résistance de ces mélanges à la pénétration des agents extérieurs potentiellement agressifs.

La réduction de la pénétrabilité peut résulter de la réaction pouzzolanique des poudres de verre qui consomment la portlandite pour produire plus de gel C-S-H et réduire davantage les pores connectés. Cette réaction pouzzolanique favorise la réduction de la taille des grains, de la porosité, de la taille des pores et de l'interconnectivité des pores. La réduction de l'interconnectivité des pores occasionne une augmentation de la segmentation des pores qui est à l'origine de la réduction de la pénétrabilité.

Les travaux effectués par SHAYAN et coll., 2006 sur des mélanges de rapport E/L = 0,49, ont illustré également la réduction significative de la pénétrabilité des bétons en présence de la poudre de verre.

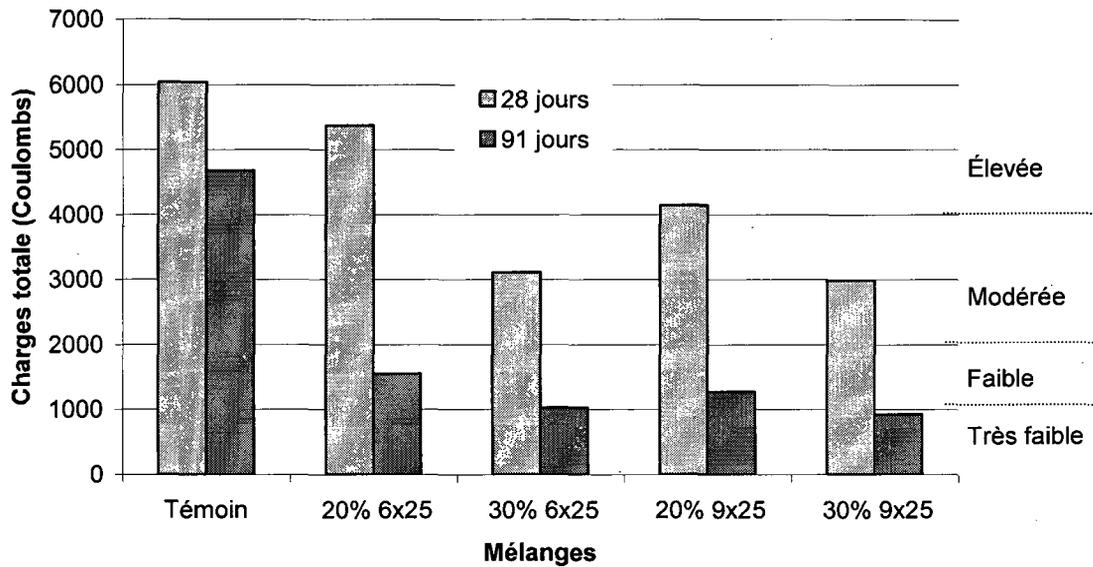


Figure 4.31 Pénétrabilité des ions chlorures des bétons conventionnels

4.4.11 Retrait de séchage

La figure 4.32, montre un léger gonflement des mélanges entre 1 et 28 jours, résultant du murissement dans l'eau dans cette période. Jusqu'à 140 jours, les valeurs de retrait de séchage des mélanges incorporant les poudres de verre sont similaires à ceux du témoin. Un retrait maximum de 0,053 % est obtenu dans le mélange témoin. Ces résultats semblent signifier que les poudres de verre broyé n'ont pas d'effet sur le retrait de séchage des bétons.

Cette tendance a été également rapportée par SHAYAN et coll., 2006 sur des bétons de rapport E/L = 0,49 incorporant 20 et 30 % de poudre de verre.

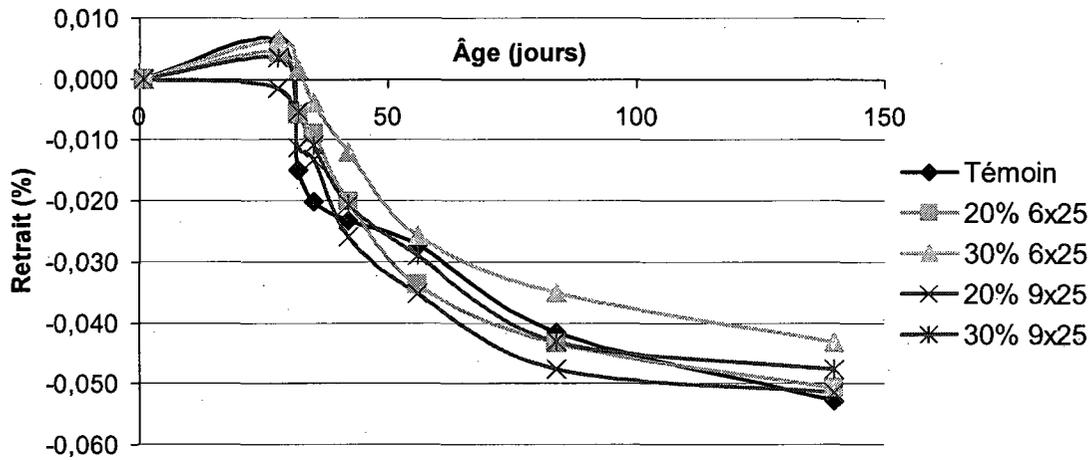


Figure 4.32 Retrait de séchage des bétons conventionnels

4.4.12 Résistance à la réaction alcalis-granulats sur des prismes de bétons

Les résultats de la réaction alcalis granulat sur des prismes de bétons de dimensions 75 x 75 x 275 mm sont présentés sur la figure 4.33. L'essai est effectué selon la norme CSA A23.2-14A. Les expansions dues à la RAG dans les mélanges incorporant les poudres de verres sont inférieures à celles du témoin, mais dépassent dès 91 jours, la limite maximale de 0,040 % à 2 ans, spécifiée dans la norme CSA A23.2-28A. À 182 jours, les mélanges avec 20 % et 30 % de poudres de verre présentent des expansions équivalentes à 0,45 et 0,35 fois celle du témoin respectivement, illustrant ainsi la capacité de la poudre de verre, malgré sa forte teneur en alcalis, à réduire les expansions due à réaction alcalis granulat. Cette réduction de l'expansion en présence de la poudre de verre résulte probablement de sa réaction pouzzolanique qui pourrait occasionner une diminution du pH du milieu, ralentissant en conséquence la mise en solution des alcalis. La réduction de l'expansion due à la RAG est généralement observée dans tous les bétons contenant des ajouts cimentaires. Plusieurs travaux [HASPARYK et coll., 2000, RAMLOCHAN et coll., 2000, IRDON, 1983, RICHARDSON et coll., 2005], ont rapporté que l'incorporation de la cendre volante, de la fumée de silice, du métakaolin et du laitier réduit l'activité des alcalis dans les bétons.

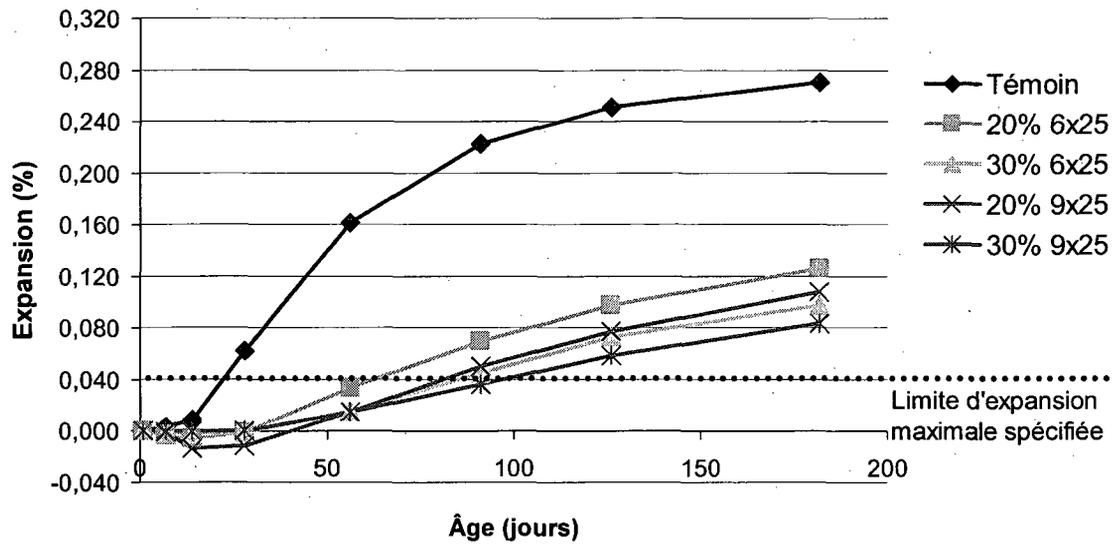


Figure 4.33 Expansion due à la réaction alcalis-granulat sur bétons

4.5 Bétons à haute performance

Des mélanges de bétons incorporant 0, 20 et 30 % des poudres de verre 6×25 et 9×25 avec un dosage en liant de 400 kg/m³ et un rapport E/L = 0,40 ont été aussi considéré dans cette étude. La composition des mélanges est présentée par le tableau 4.11.

TABLEAU 4.11 MÉLANGES DES BÉTONS À HAUTE PERFORMANCE

Matériaux	Composition par m ³ du BHP E/L=0,40				
	témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25	
		20%	30%	20%	30%
Airex-L (ml/100kg)	180	210	250	200	280
SP, Disal (% extrait sec)	0,735	0,63	0,63	0,63	0,63
SP, Disal (l/m ³)	5,79	4,96	4,96	4,96	4,96
Ciment (kg)	400	320	280	320	280
Poudre de verre (kg)	-	80	120	80	120
Granulat fin sable 5mm (kg)	703	686	677	686	677
Gros Granulat 20mm (kg)	1070	1070	1070	1070	1070

4.5.1 Paramètres d'ouvrabilité

Le tableau 4.12 montre que pour un dosage en superplastifiant de 4,96 l/m³ soit 0,83 l/m³ ou 14 % de moins que le témoin, les mélanges avec 20 et 30 % de poudre de verre présentent des affaissements à 10 min similaire à celui du mélange témoin. Ces résultats confirment la réduction de la demande en superplastifiant observée dans l'essai de l'écoulement au cône Marsh.

TABLEAU 4.12 PROPRIÉTÉS À L'ÉTAT FRAIS DES BHP

Caractéristiques	Témoin		Poudre 6×25				Poudre 9×25			
			20%		30%		20%		30%	
	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	60 min	10 min	60 min
Airex-L (ml/100kg)	180		210		250		210		250	
SP Disal (g/mélange) (% extrait sec)	700 (0,735)		600 (0,63)		600 (0,63)		600 (0,63)		600 (0,63)	
Air (%)	6,4	5,2	7,8	5,5	8,0	6,0	7,5	6,1	8,5	8,0
Affaissement (mm)	180	170	190	165	215	190	190	100	210	180
Masse volumique (kg/m ³)	2282	2325	2248	2313	2215	2285	2247	2293	2207	2216
Température (°C)	19,1	19,4	18,8	19,2	18,8	18,7	19,4	19,7	19,3	19,8

4.5.2 Temps de prise

Les temps de prise des différents mélanges étudiés sont illustrés sur la figure 4.34. Les temps de prise initiales des mélanges avec 20 % de poudres de verre sont similaires à celui du témoin et leurs temps de prise finale sont légèrement supérieurs à celui du témoin. Les mélanges avec 30 % de poudre de verre ont temps de prise initiale et finale légèrement supérieurs à ceux du témoin. Les temps de prise des mélanges contenant les poudres de verre sont tous similaires quel que soit le taux de remplacement par la poudre de verre. Ces résultats reflètent un faible retard de prise dans les mélanges incorporant la poudre de verre comparativement au mélange témoin.

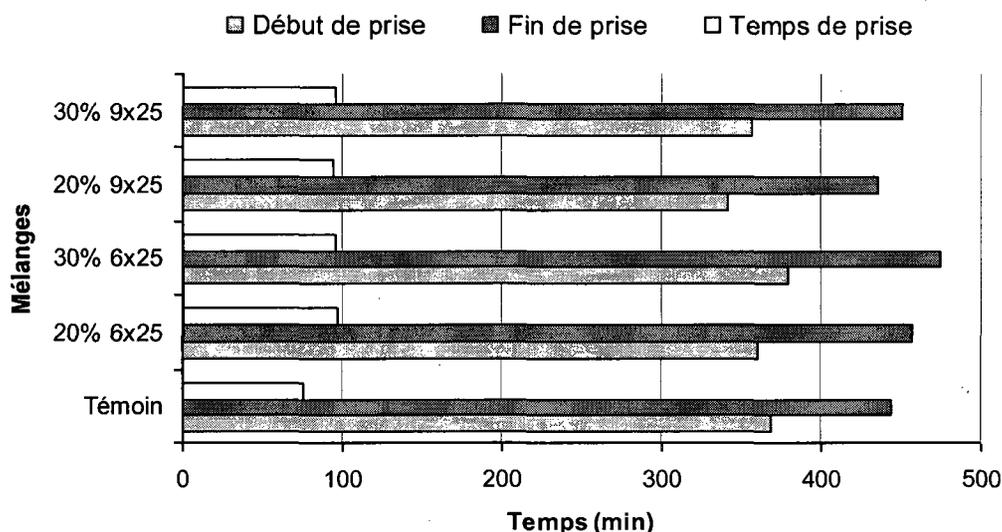


Figure 4.34 Temps de prise des bétons à haute performance

4.5.3 Résistance à la compression

Les résistances à la compression présentées dans le tableau 4.13 et exprimés sur les figures 4.35 et 4.36, illustrent l'effet de la poudre de verre sur cette caractéristique mécanique du béton. La figure 4.35 illustre la variation de la résistance à la compression des mélanges en fonction de l'âge tandis que la figure 4.36 montre le développement de gain de résistance de chaque mélange. Les résistances à la compression des mélanges avec poudres de verre sont toutes inférieures d'au moins 7 MPa à celle du témoin, quel que soit l'âge. Entre 1 et 28 jours, les résistances à la compression des mélanges avec 20 % d'une poudre de verre sont supérieures d'environ 5,5 MPa à celles des mélanges avec 30 % de la même poudre. À 28 jours les résistances à la compression des mélanges avec 20 % et 30 % de poudres de verre représentent respectivement 82 % et 71 % de celle du témoin. Entre 28 et 91 jours, le taux de développement de résistance du témoin est de 9 % et ceux des mélanges avec 20 % et 30 % des poudres de verre sont respectivement de 12 % et 18 %. Le taux de développement de la résistance à la compression du mélange contenant 30 % de poudre de verre est plus élevé que ceux du mélange contenant 20 % de poudre et le témoin, illustrant un développement de résistance relativement proportionnelle au taux d'incorporation de la poudre de verre.

La figure 4.36 montre que les gains de résistance à 7 ou 28 jours sont similaires dans tous les mélanges, mais à 91 jours, ils sont plus importants dans les mélanges incorporant la poudre de verre que dans le témoin. Le gain de résistance à un âge donné est définie comme la différence entre la résistance à la compression à cet âge et celle obtenue à l'âge de 24 heure. Ces observations montrent la lenteur dans le développement de résistance à jeune âge, mais plus important à long termes en présence de la poudre de verre broyé. La poudre de verre occasionne une faible augmentation de la résistance à la compression entre 1 et 28 jours, mais accentue son développement à long terme. Cette tendance résulte de sa réactivité lente.

TABLEAU 4.13 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BHP

Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)				
	témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25	
		20%	30%	20%	30%
1	27,5	20,4	14,6	20,6	15,1
7	39,0	30,1	25,7	33,6	27,4
28	47,9	39,1	34,0	40,4	34,8
91	53,1	46,1	44,7	49,0	45,9

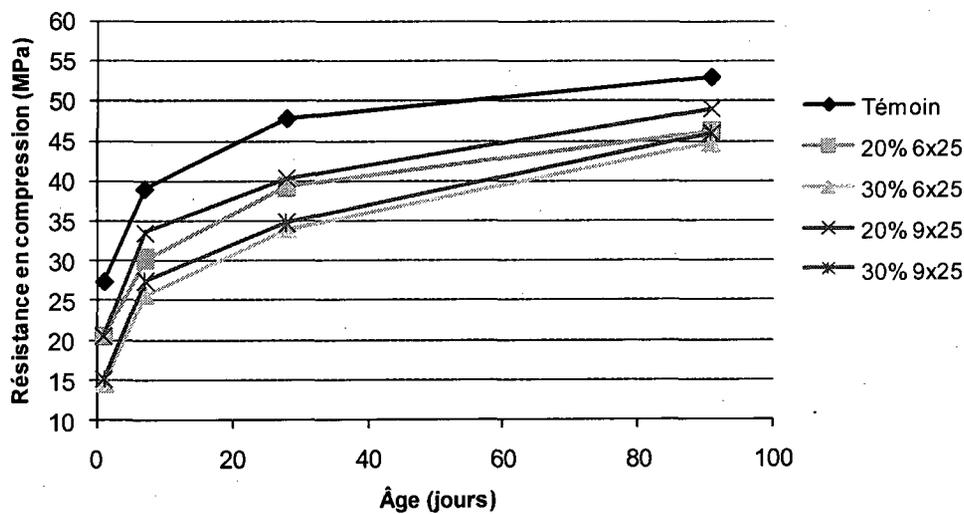


Figure 4.35 Résistance à la compression des bétons à haute performance

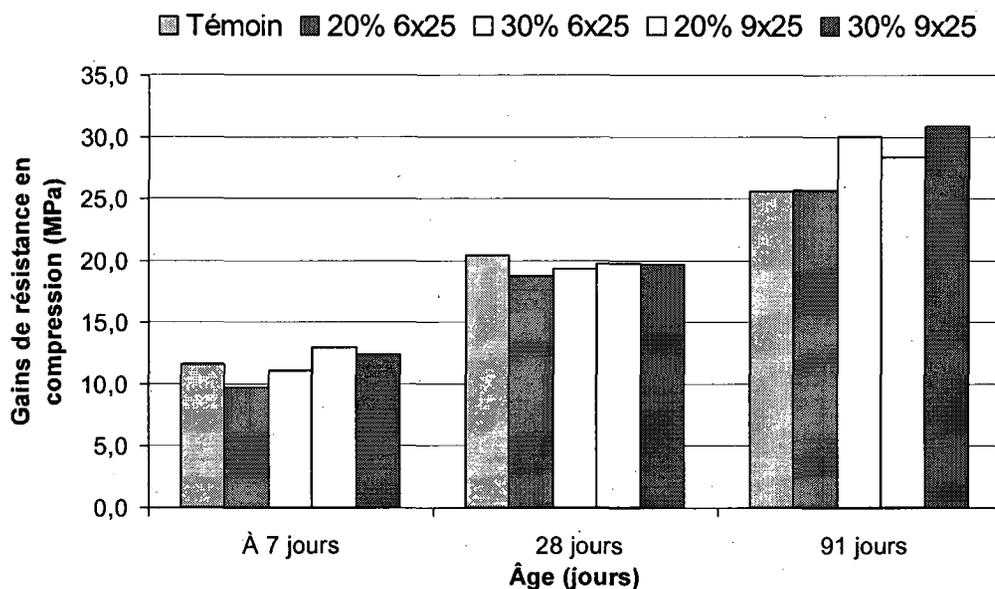


Figure 4.36 Gains de résistance à la compression des bétons à haute performance

4.5.4 Résistance en traction par fendage

Les résistances en traction par fendage à 28 jours et à 91 jours des mélanges contenant la poudre de verre (figure 4.37) sont similaires à celles du témoin à l'exception du mélange avec 30 % de la poudre de verre 6x25 dont la résistance est légèrement inférieure à celle du témoin à 28 jours. TAHA et coll., 2008a ont aussi observé qu'un béton avec 20 % poudre de verre de rapport E/L = 0,38 développe de résistance en traction par fendage similaire à celle du témoin.

La relation $f_t = 0,273f_c^{2/3}$ [Comité Euro-International du béton CEB-FIT, 1978] semble donner une meilleure corrélation entre nos résultats de la résistance à la compression et de la résistance à la traction par fendage. Cependant, on remarquera que le mélange témoin présente des résistances en traction similaires à celles prédites par cette relation par contre les mélanges incorporant la poudre de verre présentent des résistances en traction supérieures aux valeurs estimées d'environ 5 à 20 %.

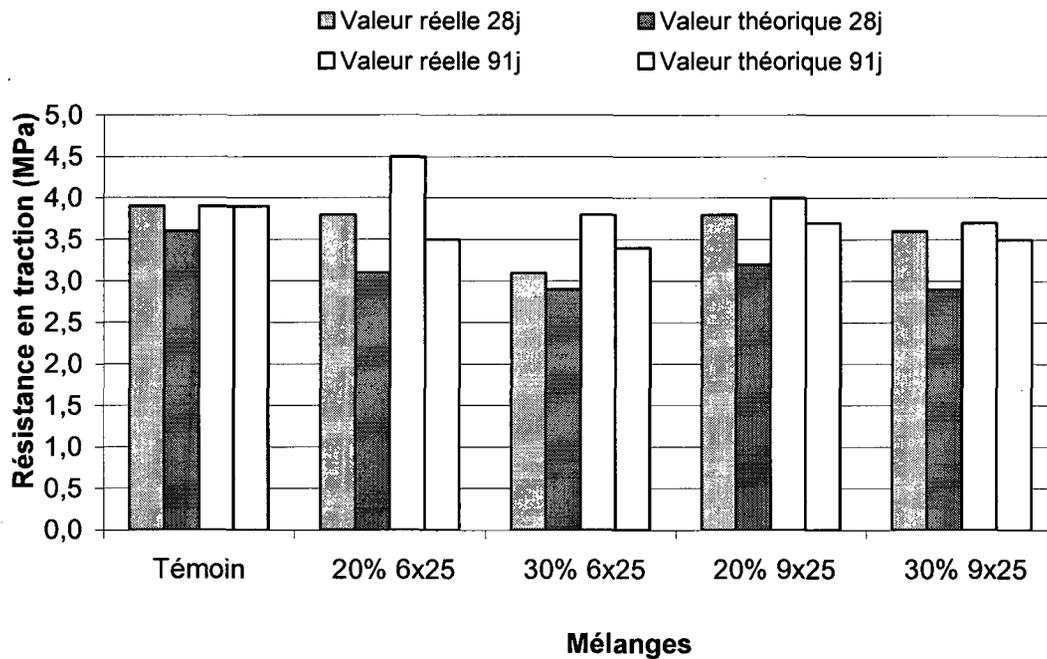


Figure 4.37 Résistance en traction par fendage des bétons à haute performance

4.5.5 Résistance en flexion

La résistance en flexion à 28 jours de chaque mélange est présentée sur la figure 4.38. Les mélanges incorporant 20 % et 30 % des poudres de verre développent des résistances en flexion inférieures d'au moins 0,6 MPa soit 10 % et 1,3 MPa soit 21 % à celle du témoin respectivement. Par contre une étude conduite par TAHA et coll., 2008a révèle que le mélange avec 20 % de poudre de verre de rapport $E/L = 0,38$ présente des résistances en flexion similaires à celle du témoin.

Les résistances en flexion sont bien corrélées avec celles de la compression par la relation $f_l = 0,94 * \sqrt{f_c}$ donnée dans le manuel ACI 363-84. On remarque que tous les valeurs estimées sont supérieures de l'ordre de 6 à 18 % aux valeurs réelles.

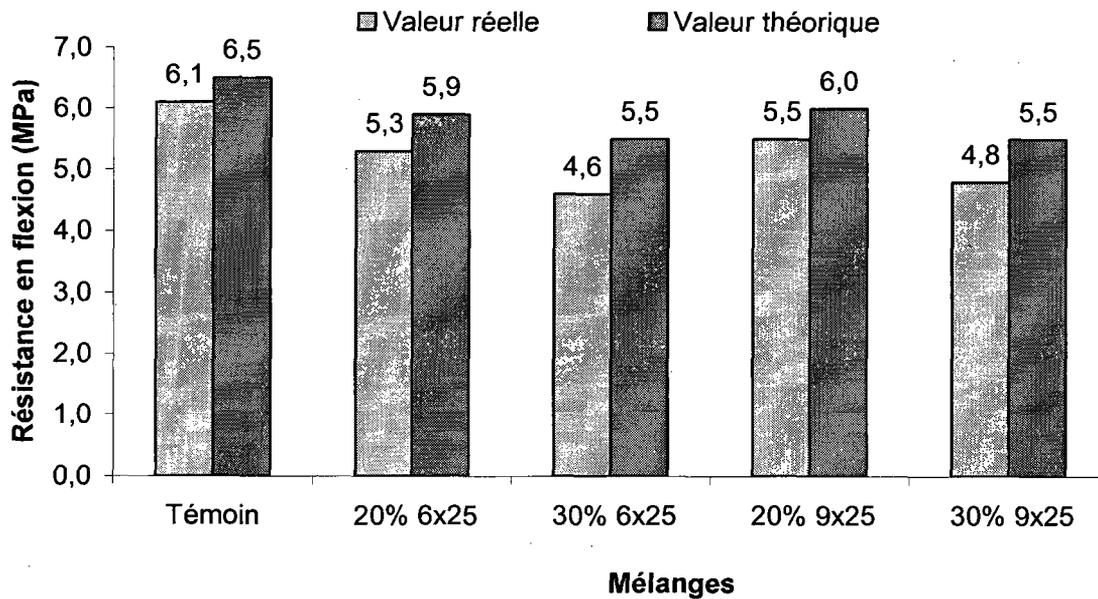


Figure 4.38 Résistance en flexion des bétons à haute performance

4.5.6 Module d'élasticité

Les modules d'élasticité des mélanges incorporant des poudres de verre, figure 4.39, sont inférieurs d'environ 4 GPa soit 11 % à celui du témoin à 28 jours. À 91 jours, ces mélanges binaires présentent des modules d'élasticité inférieurs de 2 GPa soit 10 % à celui du témoin. Que ce soit à 28 ou 91 jours, les modules d'élasticité des mélanges incorporant la poudre de verre représentent environ 90 % de celui du témoin. En considérant seulement les mélanges incorporant la poudre de verre, on remarque que leurs modules d'élasticité à 28 jours comme à 91 jours sont similaires, à l'exception du mélange avec 30% 9x25. En effet, le mélange avec 30 % 9x25 présente des modules d'élasticité inférieurs de 3 GPa et 5 GPa à ceux des autres mélanges avec poudres de verre, respectivement à 28 et 91 jours.

La relation $E_c = 5\sqrt{f_c}$ [CAN A23-3-M84], illustre une bonne corrélation entre les modules d'élasticité et les résistances à la compression.

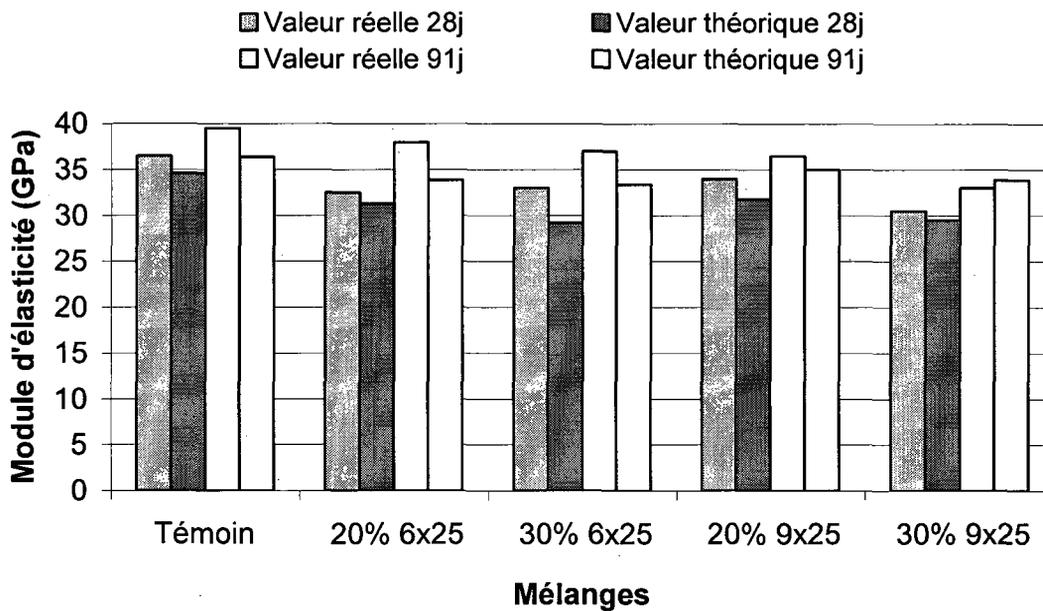


Figure 4.39 Module d'élasticité des bétons à haute performance

4.5.7 Caractéristiques du réseau d'air dans le béton durci

Le tableau 4.14 et les figures 4.40 et 4.41, montrent de pertes significatives d'air à l'état durci par rapport aux valeurs mesurées à l'état frais dans tous les mélanges. La perte d'air est de 3,2 % dans le mélange témoin et oscille entre 2 et 3,5 % dans les mélanges incorporant les poudres de verre. Le mélange témoin présente un facteur d'espacement de 445 μm largement supérieur à 230 μm (spécifié dans la norme CSA A23.1 pour les bétons ayant E/L supérieur 0,36) et plus élevé que ceux des mélanges avec poudres de verre. À l'exception du mélange 30 % de la poudre de verre 9x25, tous les autres mélanges avec poudre de verre présentent de facteurs d'espacement supérieurs à 230 μm et des surfaces spécifiques inférieures à 25 mm^{-1} . Ces résultats ne reflètent pas de bonnes caractéristiques du réseau d'air dans ces bétons durcis.

TABLEAU 4.14 CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU DE BULLES D'AIR DES BÉTONS
E/L = 0,40

Grandeurs caractéristiques	Mélanges				
	Témoin	20% 6×25	30% 6×25	20% 9×25	30% 9×25
Volume d'air état frais (%)	5,2	5,5	6,0	6,1	8,0
Volume d'air état durci (%)	2,0	3,5	3,0	2,6	4,6
Surface spécifique (1/mm)	16,7	18,9	21,6	23,5	29,1
Facteur d'espacement \bar{L} (μm)	445	327	286	295	177

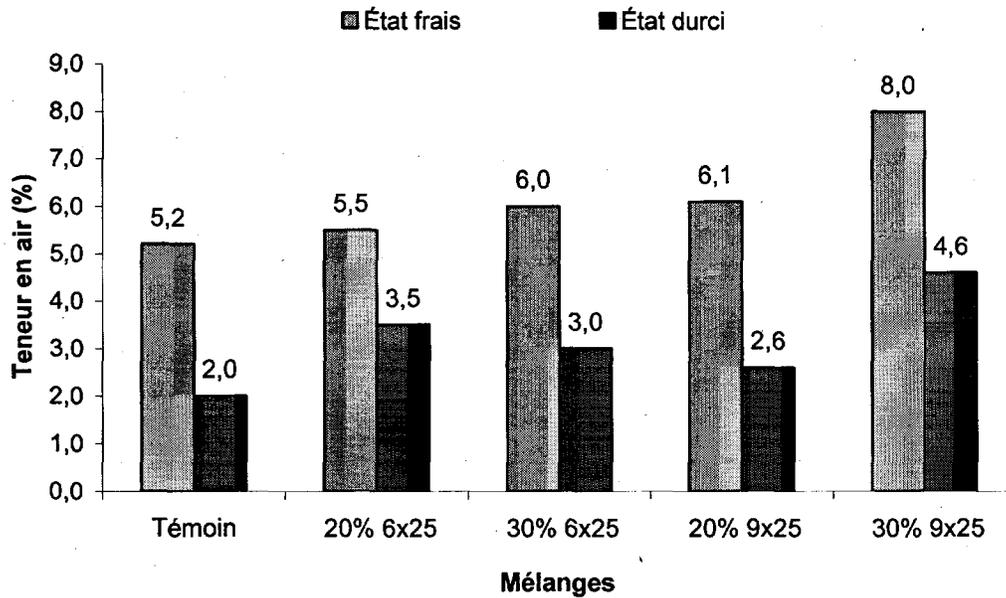


Figure 4.40 Comparaison de la teneur en air à l'état frais et durci des BHP

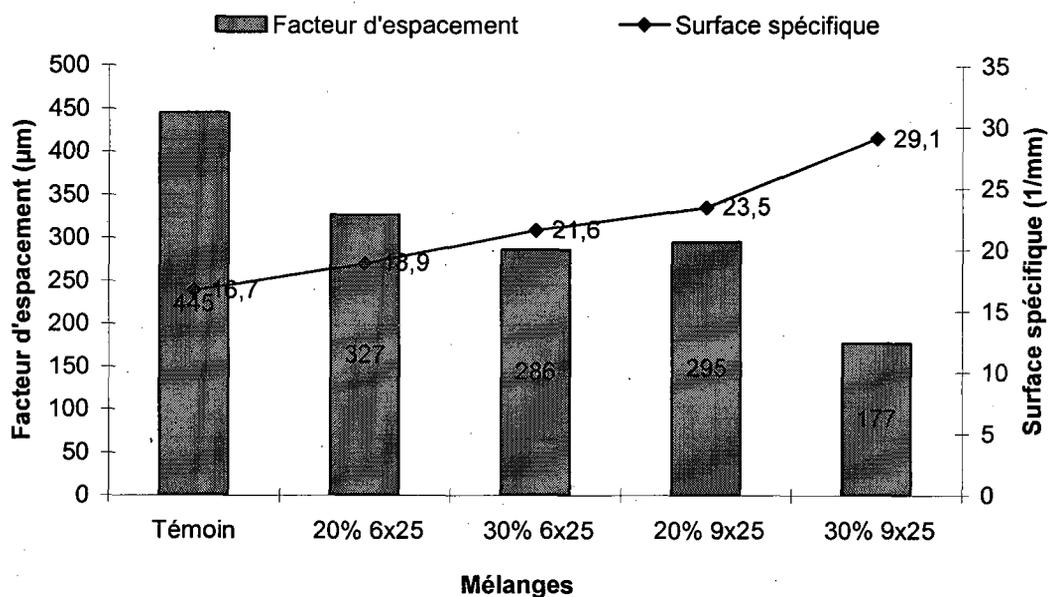


Figure 4.41 Facteur d'espacement et surface spécifique des bulles d'air des bétons E/L = 0,40

4.5.8 Durabilité aux cycles de gel-dégel rapides

L'aspect visuel des échantillons après les cycles de gel-dégel est illustré par la figure 4.42. Il montre que les échantillons des mélanges avec poudre de verre présentent moins de fissures comparativement à ceux du témoin. Les facteurs de durabilité de tous les mélanges sont égaux ou supérieurs à 100 %, dépassant largement la limite inférieure de 60 % recommandée par la norme ASTM C666. L'incorporation de la poudre de verre offre au béton un excellent facteur de durabilité, malgré un murissement de 14 jours seulement, tel que recommandé par la norme ASTM C666. Tous les mélanges ont présenté de très bonnes résistances au gel-dégel, malgré les facteurs d'espacement élevés. Ceci semble signifier que les facteurs d'espacement bien qu'élevés sont encore inférieurs à la valeur critique (\bar{L}_{crit}). En effet, de nombreux travaux ont démontré qu'un béton est durable face aux cycles de gel dégel lorsque le facteur d'espacement est inférieur à une valeur critique (\bar{L}_{crit}) qui dépend des caractéristiques du béton et des conditions d'exposition. La protection offerte par le réseau de bulles d'air ne diminue pas linéairement avec l'augmentation du facteur d'espacement mais

elle chute brutalement lorsque le facteur d'espacement dépasse la valeur critique [LANGLOIS, 1986].

TURGUT, 2008 ont également observé que la poudre de verre améliore la résistance au gel-dégel des bétons à haute performance de rapport E/L = 0,30. SHI et coll., 2005a ont aussi trouvé que les bétons légers autoplaçants incorporant la poudre de verre développent une bonne résistance au gel-dégel.

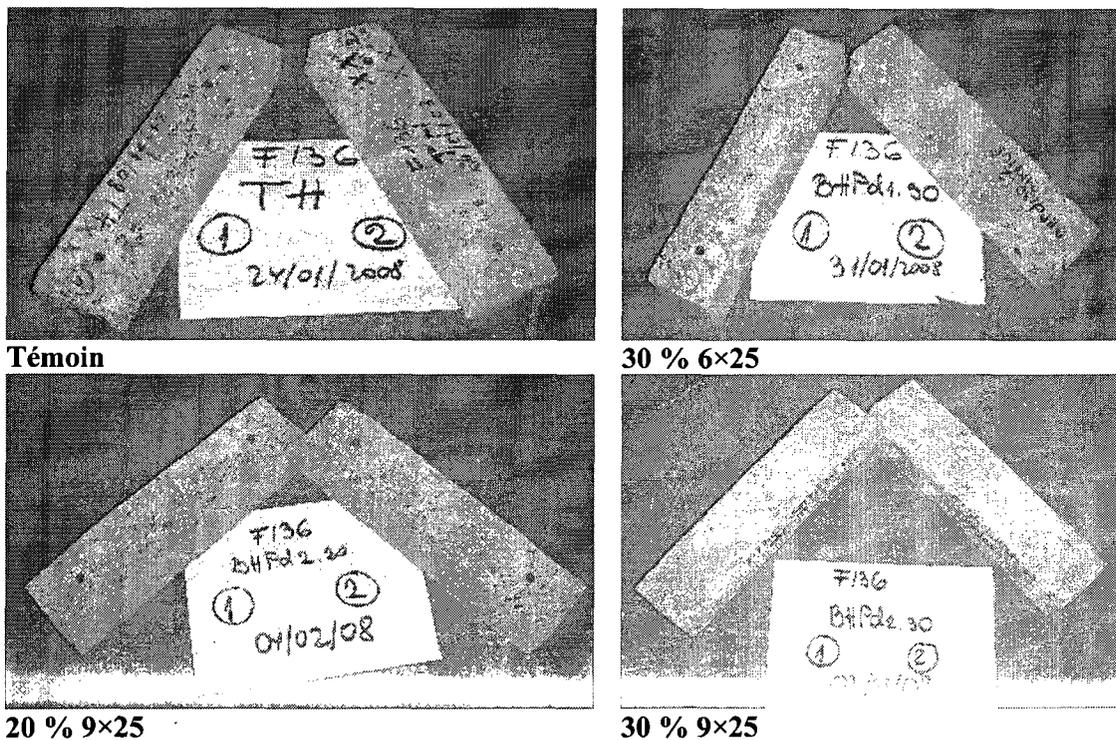


Figure 4.42 Aspects physiques des prismes des bétons à haute performance après les 300 cycles de gel dégel

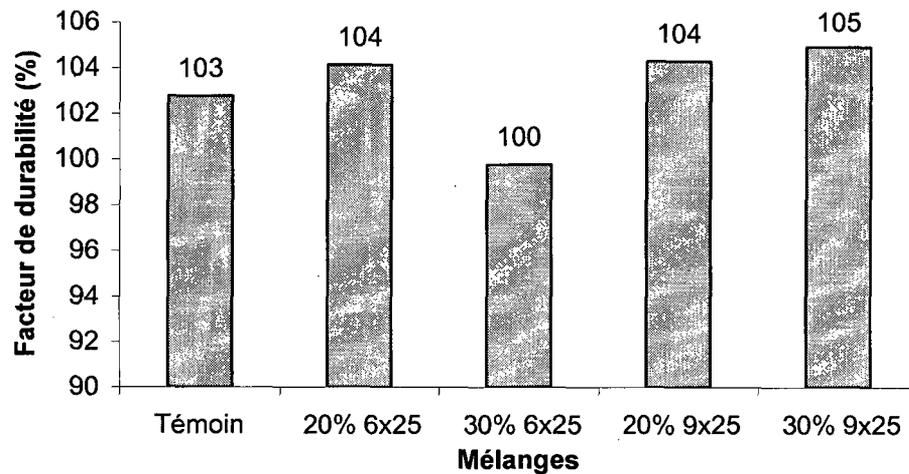


Figure 4.43 Résistance au gel-dégel des bétons à haute performance

4.5.9 Résistance à l'écaillage

Les résultats de l'écaillage des échantillons exposés aux sels déglaçants à 28 jours et à 91 jours sont résumés respectivement dans les tableaux 4.15 et 4.16. L'aspect visuel des échantillons, figure 4.44, montre que le mélange témoin et ceux incorporant la poudre de verre à l'exception de celui avec 30 % de 6×25 présentent un écaillage léger de surface avec absence de cratères. Le mélange avec 30% 6×25 contrairement aux autres, présente un écaillage relativement élevé de surface selon l'échelle d'évaluation de la norme BNQ 2621-900. Tous les mélanges incorporant la poudre de verre présentent des pertes de masses similaires ou légèrement supérieures à celles du témoin et se situent dans la limite maximale de 500 g/m² de la norme. Ces résultats mettent en évidence l'effet bénéfique de la poudre de verre sur la résistance à l'écaillage du béton avec E/L faible, comparativement à d'autres ajouts cimentaires. En effet, Saric-Coric, 2001, a observé des pertes de masse similaires de l'ordre de 770 g/m² après 50 cycles pour des mélanges avec E/L = 0,35 contenant 20 et 30 % de laitier contre 80 g/m² seulement pour le béton témoin [SARIC-CORIC, 2001].

Les pertes de masses après 56 cycles de tous les mélanges exposés à l'écaillage après 91 jours d'âge, sont inférieures à 250 g/m², la moitié de la limite prescrite par la norme BNQ 2621-900. Malgré un réseau et volume d'air non-conforme, les bétons présentent de bonnes résistances à l'écaillage. Ceci pourrait être relié à un effet positif de la poudre et à un rapport E/L faible. Puisque, selon Gagné, 1992, ce n'est qu'en abaissant suffisamment le rapport E/C à des valeurs très faibles, soit aux environs de 0,25, que l'on parvient à produire des BHP en

mesure de résister aux sels fondants sans la protection d'un réseau de bulles d'air entraîné [GAGNE, 1992].

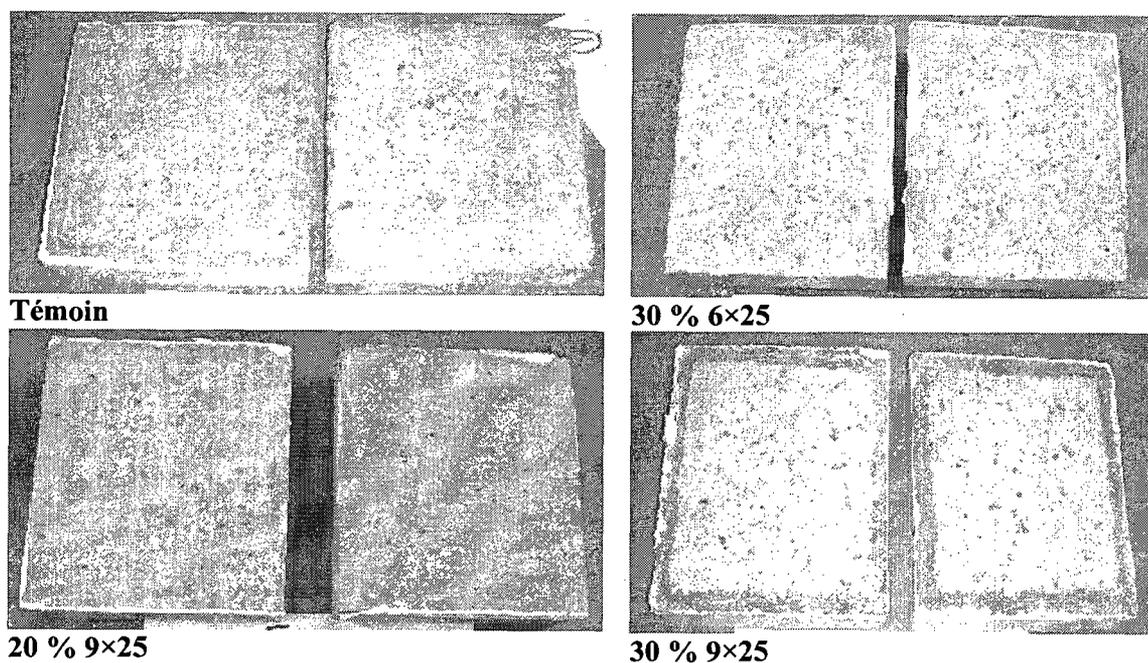


Figure 4.44 Aspects physiques des plaques des bétons à haute performance après l'écaillage à 56 cycles de gel dégel en présence de sel fondant à partir de 28 jours d'âge

TABLEAU 4.15 RÉSISTANCE DES BHP EXPOSÉS À L'ÉCAILLAGE À 28 JOURS D'ÂGE

Nombre de cycle	Perte de masse g/m ²									
	Témoin		20% 6x25		30% 6x25		20% 9x25		30% 9x25	
	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	24	0	66	0	46	0	118	1a	52	0
21	120	1a	161	1a	245	1a	158	1a	145	1a
35	217	1a	265	1b	568	1b	183	1a	202	1a
56	329	1a	352	1b	758	1b & 2a	224	1b	293	1a à 1b

TABLEAU 4.16 RÉSISTANCE DES BHP EXPOSÉS À L'ÉCAILLAGE À 91 JOURS D'ÂGE

Nombre de cycle	Perte de masse g/m ²									
	Témoin		20% 6×25		30% 6×25		20% 9×25		30% 9×25	
	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	15	1a	35	1a	63	1a	72	1a	82	1a
21	46	1a	98	1a	161	1a	114	1a	126	1a
35	65	1a	141	1a	223	1a	147	1a	159	1a
56	78	1a	186	1b	252	1b	184	1b	189	1a

4.5.10 Pénétrabilité des ions chlorures

La figure 4.45 montre que les mélanges contenant la poudre de verre présentent des résistances à la pénétration des ions chlorures plus élevées que celles du témoin. Ces résistances sont d'autant plus élevées que le taux de substitution par la poudre augmente. Les pénétrabilités à 28 jours des mélanges avec 20 % de la poudre de verre 6×25 et 9×25 représentent respectivement 0,76 et 0,89 fois celle du témoin. Celles des mélanges avec 30 % de la poudre verre 6×25 et 9×25 correspondent respectivement à 0,66 et 0,71 fois celle du témoin. Ces observations illustrent une meilleure réduction de la pénétrabilité du béton avec 30 % de poudres qu'avec 20 % de poudres. Cette tendance se dégage également sur les résultats de 91 jours. En effet, les pénétrabilités à 91 jours des mélanges avec 20 % de la poudre de verre 6×25 et 9×25 sont de 0,48 et 0,47 fois celle du témoin respectivement. Celles des mélanges avec 30 % de la poudre de verre 6×25 et 9×25 sont respectivement de 0,30 et 0,31 fois celle du témoin. À 91 jours, selon la classification donnée par la norme ASTM C1202, le témoin et les mélanges avec 20 % et 30 % de poudre de verre sont classés respectivement dans la catégorie de pénétrabilité modérée, faible et très faible. Cette réduction

de la pénétrabilité résulte de l'activité pouzzolanique de poudre de verre comme expliquée dans la section 4.4.10.

Des essais de pénétrabilité des ions chlorures effectués par SCHWARZ et coll. (2008b) sur des mélanges incorporant 0, 20 et 30 % de la poudre de verre de rapport E/L = 0,40, révèlent également une réduction considérable de la pénétrabilité des mélanges qui est relativement proportionnelle au taux de substitution par la poudre de verre.

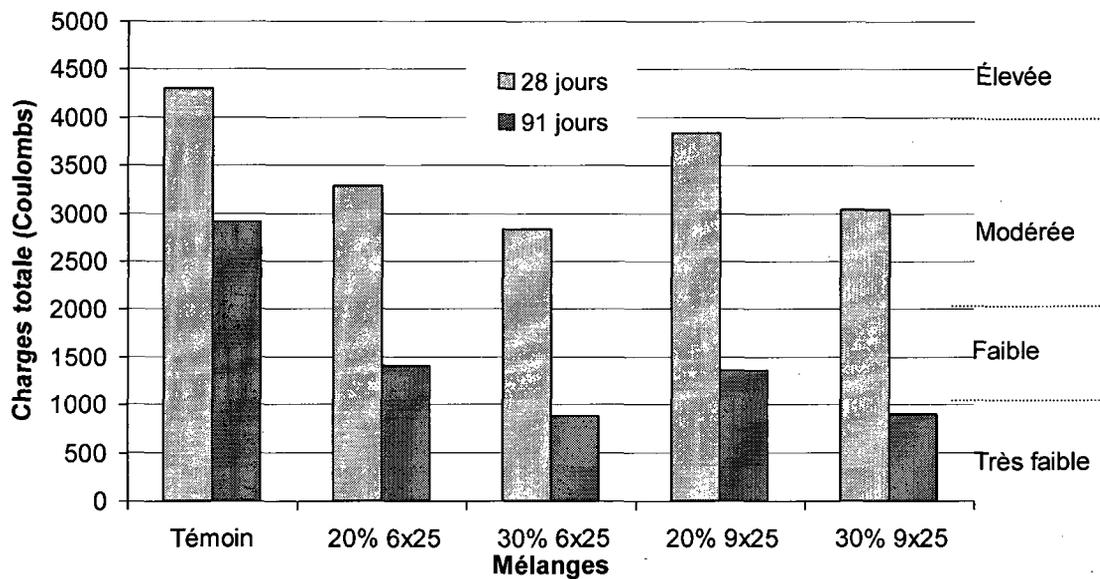


Figure 4.45 Pénétrabilité des ions chlorures des bétons à haute performance

4.5.11 Retrait de séchage

La figure 4.46 présente les retraits de séchage, obtenus conformément à la norme ASTM C157. Entre 1 et 28 jours les mélanges présentent de légers gonflements résultant du murissement dans l'eau pendant cette période. Les mélanges incorporant les poudres de verre présentent de retraits similaires qui se traduisent par des courbes assez confondues avec des valeurs supérieures à celles du témoin. Cette augmentation du retrait de séchage dans les mélanges incorporant les poudres de verre comparativement au témoin semble refléter un effet

combiné du retrait de séchage et du retrait endogène qui est plus important dans ces mélanges, conséquence de leur fine porosité. La fine porosité favorise la formation des ménisques très courbés qui occasionnent des fortes dépressions capillaires et augmentent la contraction volumétrique.

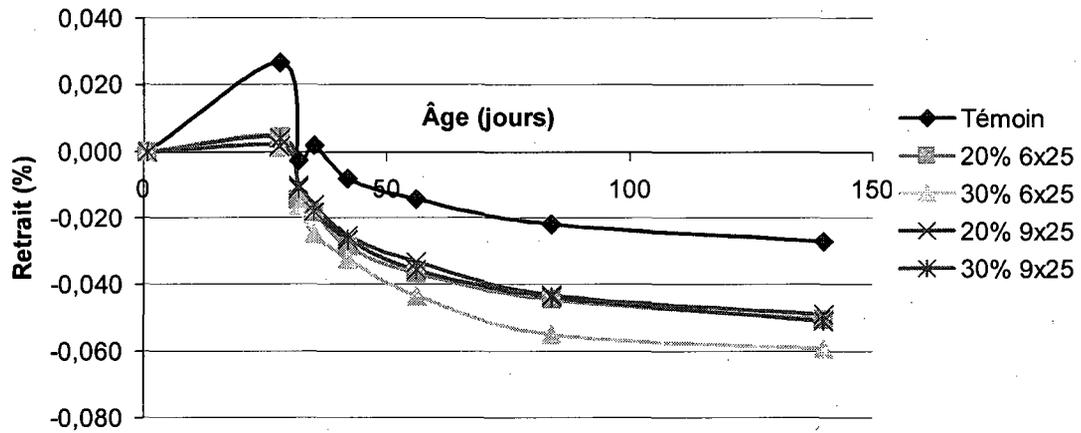


Figure 4.46 Retrait de séchage des bétons à haute performance

4.6 Comportement de la poudre de verre dans les mélanges $E/L = 0,55$ comparé à celui des mélanges $E/L = 0,40$

L'étude révèle que la poudre de verre facilite l'entraînement de l'air dans les mélanges avec $E/L = 0,55$ contrairement aux mélanges avec $E/L = 0,40$, où une légère difficulté d'entraînement de l'air a été observée. En effet, l'incorporation de 20 % ou 30 % de la poudre de verre, indépendamment de sa finesse, a occasionné une diminution du dosage en AEA respectivement de 20 ml/100 kg (31 %) et de 25 ml/100 kg (38 %) de liant par rapport au témoin. Dans les mélanges avec $E/L = 0,40$ contenant 20 % ou 30 % de la poudre de verre, on observe une augmentation respectivement de 30 ml/100 kg (17 %) et 50 ml/100 kg de liant (39 %).

Que ce soit avec $E/L = 0,55$ ou $E/L = 0,40$, les mélanges incorporant la poudre de verre présentent un retard de prise d'environ 20 min par rapport au mélange témoin. L'effet de la poudre de verre sur les durées de prise n'est pas significativement affecté par sa finesse ni par les rapports E/L étudiés.

Le développement des résistances à la compression semble être plus rapide dans les mélanges avec $E/L = 0,55$ incorporant la poudre de verre comparativement à ceux ayant $E/L = 0,40$. En effet, les mélanges avec $E/L = 0,55$ incorporant la poudre de verre présentent des résistances à la compression très similaires à celle du témoin à 91 jours, alors que celles des mêmes mélanges ayant $E/L = 0,40$ sont encore inférieures d'au moins 5 MPa à celle du témoin au même âge. Ce comportement reflète une activité pouzzolanique lente et continue de la poudre de verre dans les mélanges avec $E/L = 0,55$, tandis que dans les mélanges avec $E/L = 0,40$ la contribution de la poudre de verre résulte beaucoup plus de l'effet filler. L'effet bénéfique de l'activité pouzzolanique n'est pas très développé dans ces mélanges comme dans les mélanges avec $E/L = 0,55$. Ceci serait lié probablement à une insuffisance d'eau libre disponible dans ces mélanges à E/L faible, pouvant favoriser une poursuite optimale de la réaction pouzzolanique. Les résistances à la compression ne sont pas significativement affectées par la finesse des poudres de verre étudiées, que ce soit à $E/L = 0,55$ ou à $E/L = 0,40$.

Les modules d'élasticité des mélanges ayant un rapport $E/L = 0,55$ incorporant la poudre de verre sont égaux voire supérieurs à celui du témoin, quel que soit l'âge. Par contre dans les mélanges ayant le rapport $E/L = 0,40$ contenant la poudre de verre, les modules

d'élasticité sont inférieurs de 2 à 7 GPa à celui du témoin, dépendamment du taux d'incorporation. L'effet de finesse des poudres de verre n'est pas très prépondérant sur les modules d'élasticité des mélanges $E/L = 0,55$; alors qu'une différence de 2 GPa à 28 jours et de 4 GPa à 91 jours pourrait être observée entre les modules d'élasticité des mélanges avec $E/L = 0,40$ contenant 30 % des poudres de verre 6×25 ou 9×25 . Comme pour les résistances à la compression, la poudre de verre semble contribuer mieux à l'amélioration du module d'élasticité dans les mélanges avec $E/L = 0,55$ que dans ceux avec $E/L = 0,40$.

Tous les mélanges avec $E/L = 0,55$ ou $E/L = 0,40$ présentent d'excellents facteurs de durabilité (≥ 100), donnant une bonne appréciation de leur résistance au gel dégel en absence des sels fondants.

Les mélanges avec $E/L = 0,55$ contenant la poudre de verre présentent de perte de masse à l'écaillage supérieures à la limite maximale de 500 g/m^2 après 56 cycles spécifiée dans la norme BNQ 2621-900. Par contre tous les mélanges avec $E/L = 0,40$ présentent de pertes de masse inférieures à la limite admise.

La pénétrabilité des ions chlorures est considérablement plus réduite par rapport au témoin dans les mélanges avec $E/L = 0,55$ contenant la poudre de verre que dans ceux avec $E/L = 0,40$ quels que soient la finesse des poudres et l'âge des échantillons. La pénétrabilité des ions chlorures mesurée à 91 jours dans les mélanges avec $E/L = 0,55$ est identique à celle obtenue dans les mélanges avec $E/L = 0,40$, malgré le fait que ce dernier ait un faible dosage en eau et élevé en liant. Cette tendance est compatible avec celle observée sur les résistances à la compression. Ces observations semblent confirmer que la poudre de verre développe deux effets notamment l'effet filler à jeune âge et l'effet pouzzolanique à long terme qui est plus prépondérant. L'effet de la finesse des poudres de verre est négligeable sur la réduction de la pénétrabilité des ions chlorures.

Les retraits de séchage des mélanges avec $E/L = 0,55$ incorporant les poudres de verre sont similaires à celui du témoin. Quant aux mélanges avec $E/L = 0,40$ incorporant la poudre de verre, ils présentent également des retraits similaires entre eux, mais plus élevés que celui du témoin. Il s'en suit un effet négligeable du taux d'incorporation et de la finesse des poudres de verre sur le retrait des mélanges avec $E/L = 0,55$, alors qu'une légère augmentation du retrait en présence de la poudre de verre est observée dans les mélanges avec $E/L = 0,40$ qui serait probablement un effet de retrait endogène.

4.7 Bétons autoplaçants E/L = 0,40

Pour mieux évaluer l'effet de la poudre de verre sur les propriétés rhéologiques, nous avons considéré d'examiner le cas des bétons autoplaçants. Des mélanges incorporant 0, 20 et 30 % de la poudre de verre 6×25 et un mélange contenant 20 % des cendres volantes de classe F ont été étudiés. La composition de ces mélanges est présentée par le tableau 4.17.

TABLEAU 4.17 MÉLANGES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Matériaux	Composition par m ³ du BAP E/L=0,40			
	témoin	Cendres volantes F	Poudre de verre	
		20%	20%	30%
VMA (ml/100kg)	100,0	100,0	100,0	100,0
SP, Glénium 3030N (ml/100kg)	1157,0	1239,7	1198,3	1136,4
Ciment (kg)	440	352	352	308
Ajouts cimentaires (kg)	-	88	88	132
Granulat fin (sable) 5 mm (kg)	830	825	825	818
Gros granulat 14 mm (kg)	976	970	970	963

4.7.1 Demande en adjuvants chimiques

La demande en adjuvants chimiques de tous les mélanges est réunie dans le tableau 4.18. Dans tous les mélanges, le dosage en agent de viscosité est maintenu constant alors que le dosage en superplastifiant est varié pour obtenir l'étalement visé qui est de 650 ± 30 mm. Tout comme pour les BHP, les mélanges incorporant la poudre de verre requièrent un dosage en superplastifiant d'environ 90 ml/m^3 de moins que celui du témoin GU et du mélange avec cendres volantes. La demande en superplastifiant diminue également en fonction du taux de substitution par la poudre de verre. Les bétons sont confectionnés sans agent entraîneur d'air.

TABLEAU 4.18 DEMANDE EN ADJUVANTS CHIMIQUES DES BAP

Adjuvants/mélanges	Témoin GU	20% CV	20% 6×25	30% 6×25	Unités
Glenium 3030 NS	1157,0	1239,7	1198,3	1136,4	ml/100kg
Rhéomac VMA 362	100,0	100,0	100,0	100,0	ml/100kg

4.7.2 Déformabilité

La déformabilité des bétons est évaluée par la mesure de l'étalement et du temps T_{50} , mis par le béton pour s'étaler sur 500 mm de diamètre et puis par l'essai J-Ring. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.19 et sur les figures 4.47 et 4.48.

TABLEAU 4.19 DÉFORMABILITÉ

Mélanges	Étalement						Étalement au J-Ring		
	T_{50} (s)			Ø (mm)			Ø (mm)		
	10 min	50 min	100 min	10 min	50 min	100 min	10 min	50 min	100 min
Témoin GU	4,11	3,09	2,76	650	635	620	640	610	540
20% CV	4,26	2,53	3,56	680	680	660	670	660	510
20% 6×25	3,86	3,19	3,37	660	670	660	650	600	620
30% 6×25	4,07	3,69	4,40	670	650	650	620	600	580

Les étalements des mélanges incorporant la poudre de verre, malgré un dosage en superplastifiant légèrement plus faible, sont sensiblement similaires à celui du témoin GU. De plus la perte d'étalement après 100 min du contact eau-liant est d'environ 5 % pour le mélange témoin GU, 3 % pour le mélange avec 20 % CV et de 0 % et 3 % respectivement pour les mélanges avec 20 % et 30 % de poudre de verre. La poudre de verre favorise le maintien de la maniabilité des mélanges. La réduction de la demande en superplastifiant par la poudre de verre peut être liée à son absorption presque nulle et sa réactivité lente.

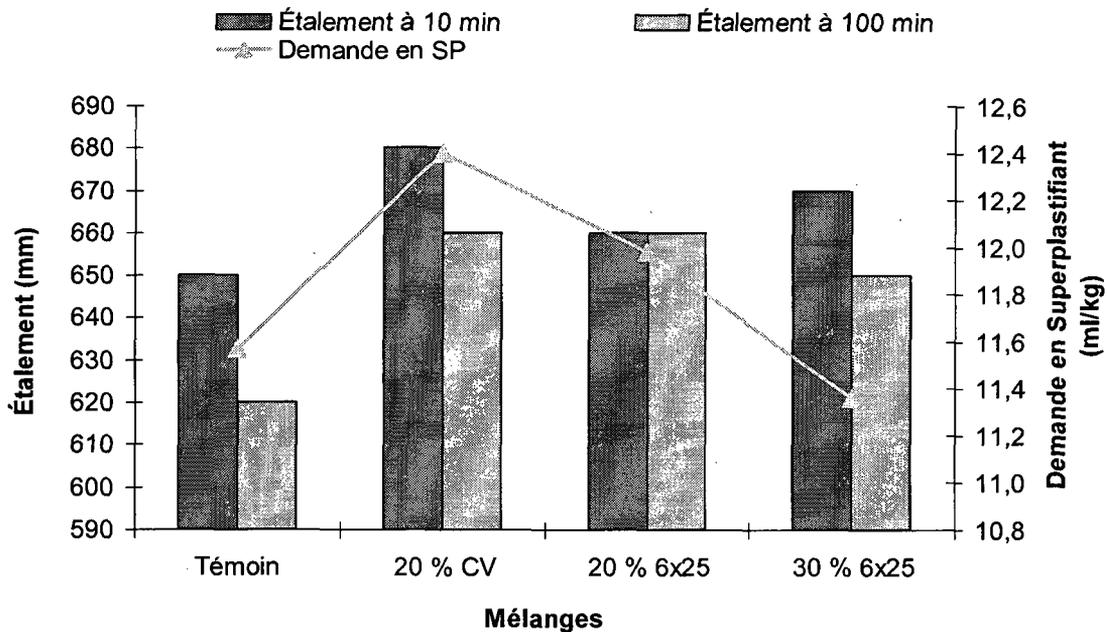


Figure 4.47 Étalement et dosage en superplastifiant des BAP

La capacité des BAP à s'écouler à travers une structure bien serrée a été évaluée à l'aide de l'essai du J-Ring et réalisé à 10 min, 50 min et 100 min du contact eau-liant (figure 4.48). Tous les mélanges ont un étalement initial à 10 min à travers les armatures, supérieur à 620 mm. De plus la différence entre l'étalement normal à 10 min et celui de l'essai J-Ring de chaque mélange est inférieure à 50 mm. C'est un bon indice de la capacité de ces bétons à s'écouler aisément à travers les structures serrées. Un BAP présente une bonne capacité à s'écouler à travers les structures densément ferrillées si la différence entre son étalement normal et son étalement J-Ring est inférieure ou égale à 50 mm [Hwang 2006].

On remarque qu'il n'y a pas de différence assez significative entre les étalements de tous les mélanges mesurés à 10 min. La perte d'étalement est moins élevée dans les mélanges contenant la poudre de verre comparativement aux mélanges témoin GU et 20 % CV. À 100 min les pertes d'étalement sont d'environ 16 % pour le mélange témoin GU, 24 % pour le mélange avec 20 % CV, 8 % pour le mélange avec 20 % 6x25 et de 6 % pour le mélange avec 30 % 6x25. Ces observations confirment le maintien de l'étalement au J-Ring dans le temps en présence de la poudre de verre.

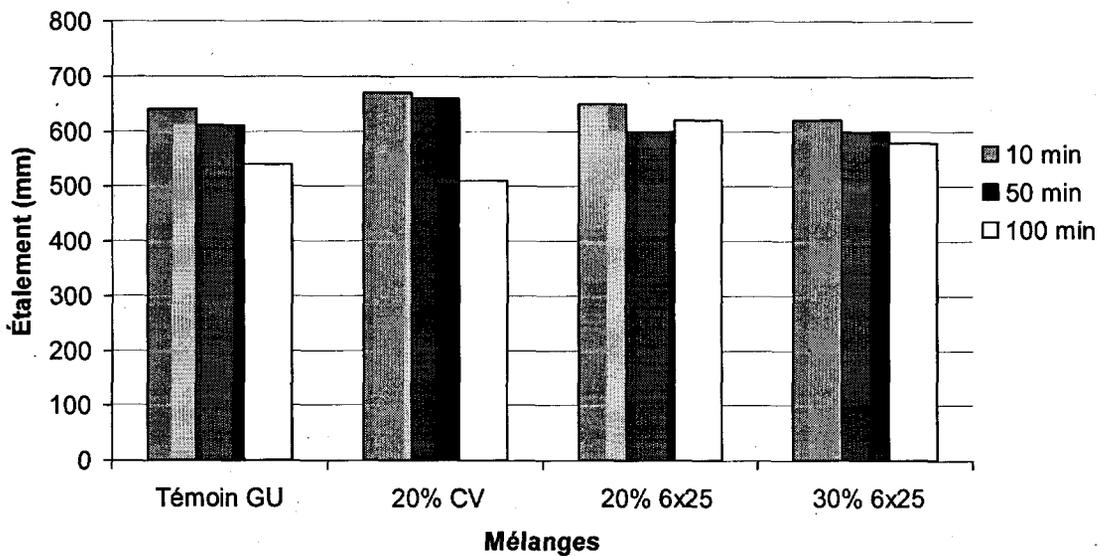


Figure 4.48 Étalement au J-Ring

4.7.3 Stabilité statique

Les paramètres mesurés pour évaluer la stabilité statique des mélanges sont le volume d'air dans le béton frais et le coefficient de ségrégation. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.20

TABLEAU 4.20 STABILITÉ STATIQUE

Mélanges	Caractéristiques			
	Teneur en air (%)			Coefficient de ségrégation (≤ 3 %) (%)
	10 min	50 min	100 min	
Témoin GU	1,6	1,6	1,7	0,6
20% CV	0,8	0,6	0,9	2,7
20% 6x25	1,1	1,1	1,1	2,4
30% 6x25	1,1	1,1	2,7	2,2

Le volume d'air mesuré est l'air occlus obtenu dans les bétons sans l'addition d'un agent entraîneur d'air.

La figure 4.49 exprime les coefficients de ségrégation des mélanges. Tous les mélanges présentent des coefficients de ségrégation inférieurs au seuil maximal qui est de 3 % [Hwang, 2006]. Ces résultats illustrent une bonne résistance à la ségrégation de tous les mélanges. Les exigences de maniabilité d'un BAP sont une grande déformabilité et une stabilité adéquate.

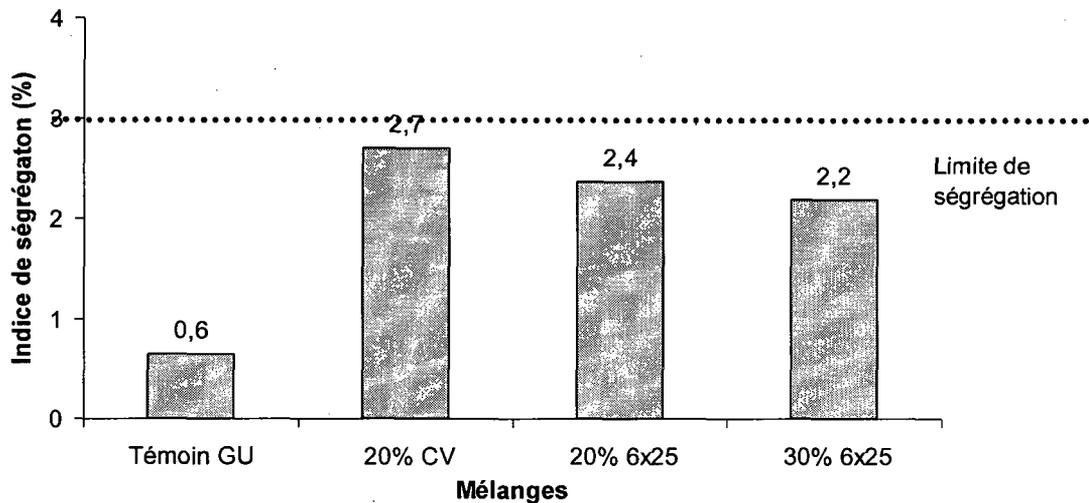


Figure 4.49 Coefficient de ségrégation des BAP

4.7.4 Stabilité dynamique

La stabilité dynamique des mélanges a été évaluée par des essais tels que la capacité de remplissage, le V-funnel et le L-Box. Les résultats de ces essais sont consignés dans le tableau 4.21.

TABLEAU 4.21 STABILITÉ DYNAMIQUE

Mélanges	Capacité de remplissage (%) ≥80%			V-Funnel (s)			L-Box					
							Temps d'écoulement (s)			h ₂ /h ₁ (%) ≥ 70%		
	10 min	50 min	100 min	10 min	50 min	100 min	10 min	50 min	100 min	10 min	50 min	100 min
Témoin GU	88	90	68	46	45	38	2,0	3,1	3,4	73	59	44
20% CV	97	94	86	5	15	19	2,4	1,9	4,5	72	59	56
20% 6×25	96	86	69	23	24	26	4,7	3,2	6,2	53	52	14
30% 6×25	98	97	96	7	8	23	2,1	3,6	14,5	82	87	28

Les résultats de la capacité de remplissage exprimés sur la figure 4.50, montrent qu'à 10 et 50 minutes tous les mélanges ont développé une capacité de remplissage supérieure à 80 %, la limite minimale requise pour un BAP. Les mélanges avec poudre de verre présentent des capacités de remplissage supérieures d'environ 10 % à celle du témoin GU.

Les capacités de remplissage des mélanges sont comprises entre 68 % et 96 % après 100 min du contact eau-liant. Ces résultats correspondent à une perte de la capacité de remplissage de l'ordre de 23 % dans le mélange témoin GU, 12 % dans le mélange avec 20 % CV, 29 % dans le mélange avec 20 % 6×25 et de 2 % dans le mélange avec 30 % 6×25. Il en résulte clairement que la poudre de verre en dosage de 30 %, contribue substantiellement à l'amélioration de la capacité de remplissage et son maintien dans le temps.

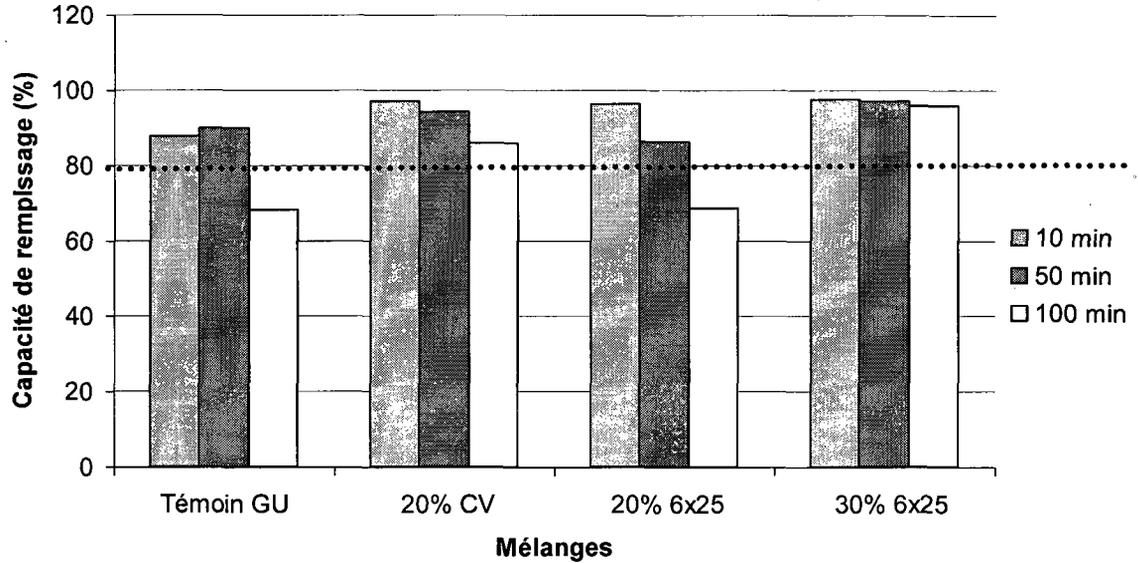


Figure 4.50 Capacité de remplissage

Les résultats de l'essai de V-Funnel exprimés sur la figure 4.51, montrent que les mélanges avec poudre de verre présentent un temps d'écoulement inférieur d'au moins 23 secondes soit 50 % à celui du témoin. Ce résultat consolide la tendance observée précédemment qui caractérise la capacité de la poudre de verre dans l'amélioration de tous les paramètres liés à l'ouvrabilité des mélanges du béton.

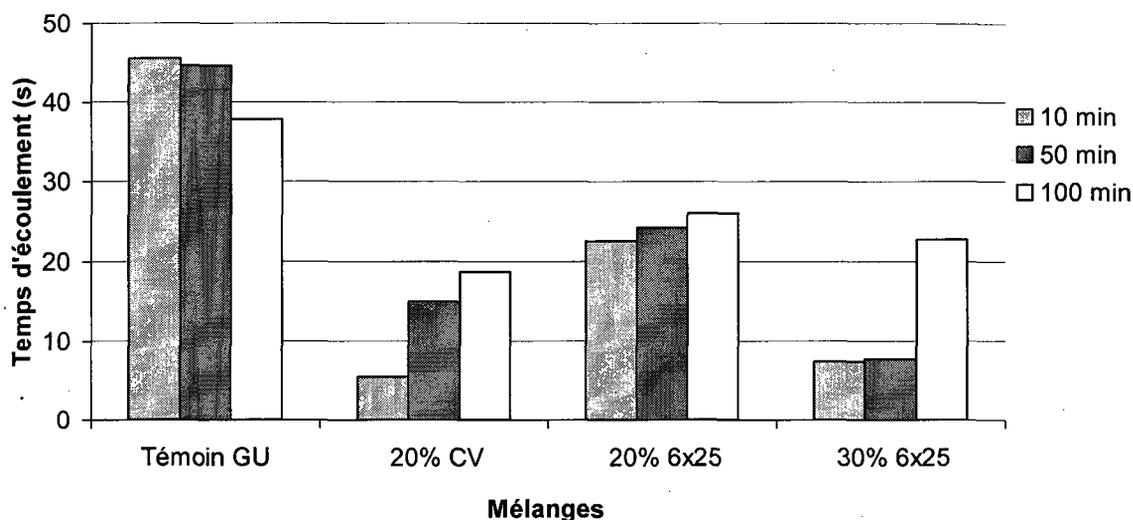


Figure 4.51 Temps d'écoulement au V-Funnel

Les résultats de L-Box expriment les valeurs du coefficient de déformabilité (h_2/h_1) illustrées par la figure 4.52. Les coefficients de déformabilité obtenus à 10 minutes des mélanges avec 20 % cendres volantes, 20 % et 30 % poudre de verre sont respectivement similaire, inférieur de 20 % et supérieur de 10 % à celui du témoin GU. Les coefficients de déformabilité de presque tous les mélanges sont supérieurs à 70 %, la limite généralement requise pour un BAP [Hwang, 2006]. La poudre de verre en dosage de 30 % semble améliorer le coefficient de déformabilité des mélanges.

Les pertes du coefficient de déformabilité observée à 100 min sont plus importantes dans les mélanges avec poudre de verre que le témoin. Ces pertes sont de 40 % dans le mélange témoin GU, 22 % dans le mélange avec 20 % CV, 74 % dans le mélange avec 20 % 6x25 et de 66 % dans le mélange avec 30 % 6x25. On remarque clairement que les mélanges avec poudre de verre présentent une perte d'environ deux fois plus importante que celle du témoin GU.

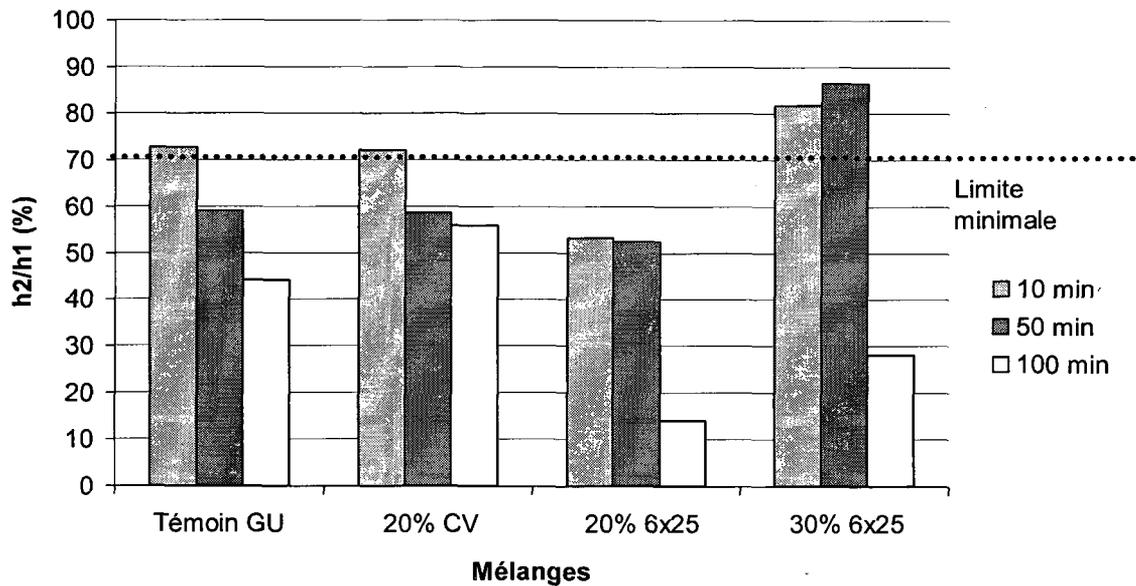


Figure 4.52 Coefficient de déformabilité au L-Box

4.7.5 Propriétés rhéologiques

Les résultats de la rhéologie obtenus à l'aide du rhéomètre de type Tattersall MKIII, sont présentés dans le tableau 4.22.

TABLEAU 4.22 PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES MESURÉES SUR LES BAP

Mélanges	Seuil de cisaillement au repos $\tau_{o \text{ repos}}$ (Pa)	Modèle de Bingham	
		τ_o (Pa)	μ_{pl} (Pa.s)
Témoin GU	434,0	88	140
20% CV	215,3	58	174
20% 6x25	283,1	59	146
30% 6x25	270,3	60	109

Le seuil de cisaillement, τ_0 et la viscosité plastique, μ_{pl} des mélanges avec la poudre de verre sont inférieurs respectivement d'environ 32 % et 21 % à ceux du témoin GU. Le mélange avec 20 % des cendres volantes présente un seuil de cisaillement identique à ceux des mélanges avec poudre de verre tandis que sa viscosité plastique est supérieure à celles de ces derniers et du témoin. Les cendres volantes semblent augmenter la viscosité plastique alors que la poudre de verre semble la diminuer. D'autres études menées par KHAYAT et coll., 2007, ont montré que les cendres volantes réduisent le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Par contre, l'effet des fumées de silice dépend du taux d'incorporation. Un remplacement partiel du ciment par peu de fumée de silice occasionne une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique tandis qu'un remplacement par beaucoup de fumée de silice provoque une augmentation des deux propriétés rhéologiques. Il a été également montré qu'une augmentation de l'ouvrabilité engendre une diminution de la viscosité plastique [KHAYAT et coll., 2007].

4.7.6 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression sont exprimés dans le tableau 4.23.

TABLEAU 4.23 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BAP

Âge (jours)	Résistance à la compression (MPa)			
	Témoin GU	CV	Poudre 6×25	
		20%	20%	30%
1	28,0	22,8	18,4	16,6
7	46,3	40,8	38,2	33,6
28	56,0	53,0	51,5	44,8
91	62,5	67,5	62,4	56,4

La figure 4.53 exprime la résistance à la compression en fonction de l'âge tandis que la figure 4.54 illustre le gain de résistance à 7, 28 et 91 jours. Entre 1 et 28 jours les mélanges incorporant la poudre de verre développent des résistances à la compression variant de 60 à 90 % de celles du témoin GU. À 28 jours, les gains de résistance des mélanges avec 20 % et 30 % de la poudre de verre sont respectivement de 1,18 et 1,0 fois celui du témoin. Entre 28 et 91 jours, les mélanges avec 20 % et 30 % de la poudre de verre développent des résistances à la compression d'environ 100 % et 90 % de celles du témoin respectivement. À 91 jours, les gains de résistance des mélanges avec 20 % et 30 % de la poudre de verre sont respectivement de 1,28 et 1,15 fois celui du témoin. La poudre de verre augmente remarquablement le gain de résistance à la compression à 91 jours comparativement au témoin.

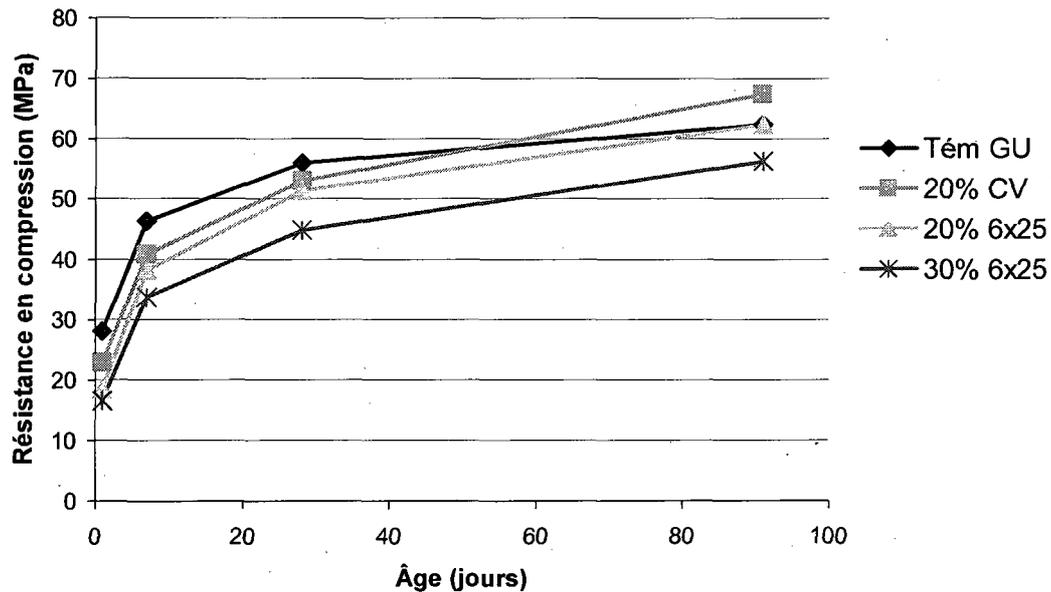


Figure 4.53 Résistance à la compression des BAP

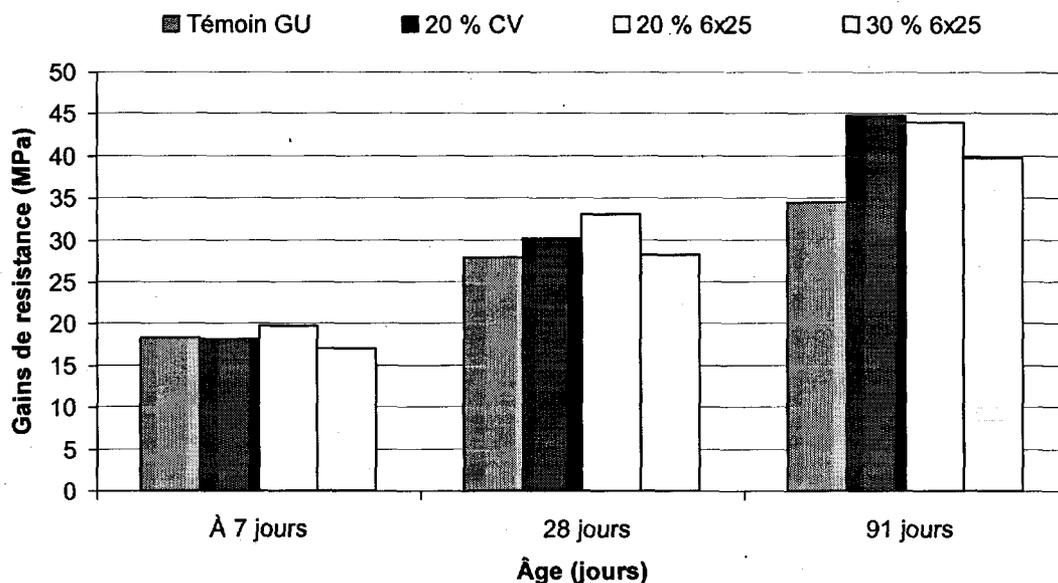


Figure 4.54 Gains de résistance à la compression des BAP

4.7.7 Module d'élasticité

Les résultats du module d'élasticité sont présentés par la figure 4.55. À 28 jours, les modules d'élasticité des mélanges avec poudre de verre sont similaires à celui du témoin. À 91 jours, les mélanges avec cendres volantes et 30 % de poudre de verre présentent des modules d'environ 1,04 fois celui du témoin GU. Ces observations illustrent une amélioration très légère du module d'élasticité en présence de la poudre de verre.

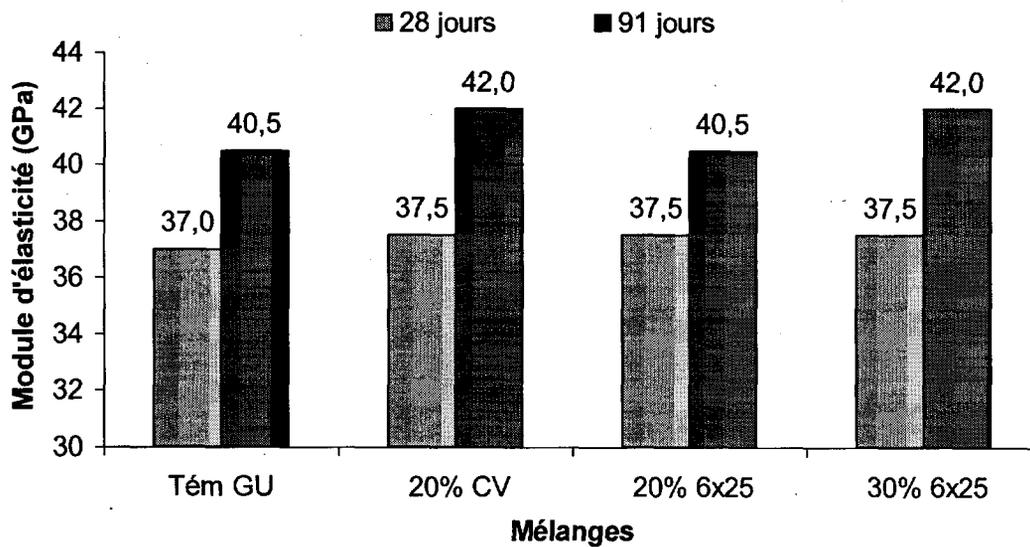


Figure 4.55 Module d'élasticité des BAP

4.7.8 Retrait de séchage

Les résultats du retrait de séchage sont exprimés sur la figure 4.56. Tous les mélanges présentent un gonflement entre 1 et 28 jours, car ils sont conservés dans l'eau. Le séchage a commencé à l'âge de 28 jours des échantillons. Entre 28 et 140 jours, les mélanges avec 20 % des cendres volantes et 30 % de poudre de verre présentent des retraits similaires à ceux du témoin GU, alors que le mélange avec 20 % de poudre de verre présentent des retraits plus importants d'environ 1,12 fois celui du témoin. On remarque que ce mélange présente le gonflement le plus faible, ce qui compenserait certainement moins son degré du retrait de séchage.

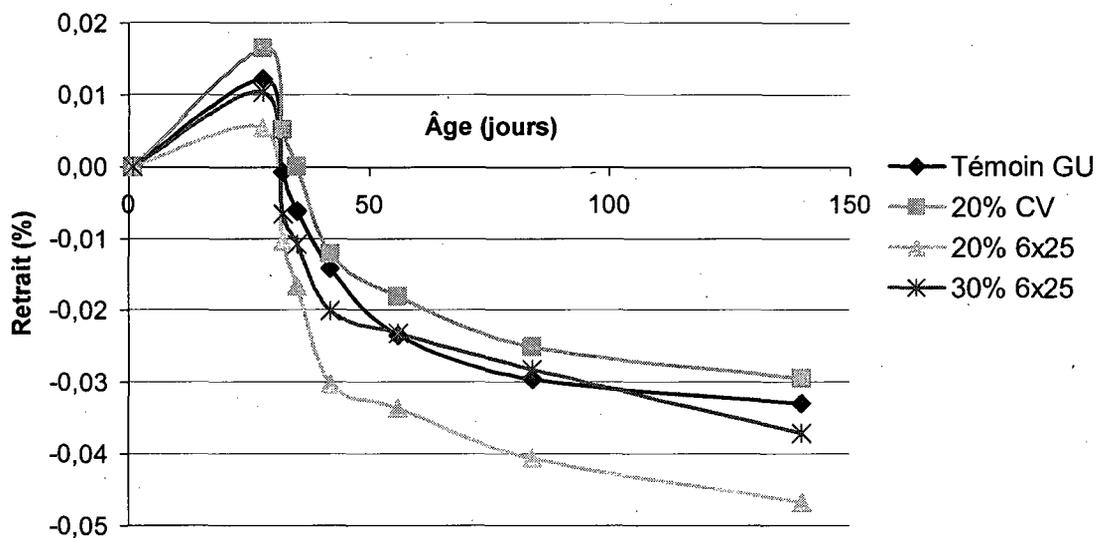


Figure 4.56 Retrait de séchage des BAP

4.8 Analyse récapitulative

Les tableaux 4.24 et 4.26 récapitulent les points positifs de chaque mélange de béton en termes d'amélioration des propriétés étudiées. Un signe "+" mentionné pour un mélange, désigne une meilleure amélioration de la propriété dans ce mélange comparativement aux autres mélanges et le témoin. Les mélanges de 30 % 6×25 et 30 % 9×25 présentent des effets similaires sur la plupart des propriétés et se départagent sur l'énergie de broyage et la résistance à l'écaillage. Les signes mis en gras dans les tableaux 4.24 et 4.25, indiquent les propriétés pour lesquelles les mélanges avec 30 % 6×25 et 30 % 9×25 se démarquent fortement des autres (très positif ou très négatif). D'ailleurs ces points mis en gras ont été considérés plus déterminants dans le choix du mélange optimal. En effet, concernant l'énergie de broyage, le broyage de la poudre 6×25 favorise un meilleur gain d'énergie comparativement à 9×25. L'incorporation de 30 % de la poudre de verre offre un meilleur impact environnemental par rapport à 20 % d'incorporation. Les résistances à la compression des mélanges incorporant la poudre de verre sont similaires entre elles mais inférieures à celles du témoin entre 7 et 28 jours. Cette situation est représentée par de signes "-" dans les tableaux récapitulatifs. Par contre à 91 jours, elles sont encore inférieures ou égales à celle du témoin, d'où l'alternance des signes "+" et "-" dépendamment de la tendance de chaque mélange. Les résistances au gel dégel sont très bonnes pour tous les mélanges, et sont représentées par "+". Que ce soit pour $E/L = 0,55$ ou $0,40$, le mélange avec 30 % de la poudre 9×25 présente de bonnes résistances à l'écaillage, notée "+", par contre le mélange avec 30 % de la poudre 6×25 présente une résistance modérée à l'écaillage, notée "-". Les pénétrabilités des ions chlorures se trouvent considérablement réduites dans les mélanges incorporant les poudres de verre et sont consignées "++" ou "+++" dépendamment du niveau de réduction. Cette analyse récapitulative a servi de dégager le choix du mélange optimal avec des justifications.

TABLEAU 4.24 RÉCAPITULATION DES EFFETS SUR CERTAINES DES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS E/L=0,55

Mélanges et dosage		Énergie de broyage	Impact environnemental	E/L = 0,55									
				Résistance à la compression (MPa)			Module d'élasticité (GPa)		Gel dégel (%)	Écaillage 56 cycles (g/m ²)		Pénétrabilité des ions Cl ⁻ (Coul.)	
				7j	28j	91j	28j	91j	14j	28j	91j	28j	91j
6×25	20%	+		-	-	-	+	+	+	-	-	+	++
	30%	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+++
9×25	20%			-	-	-	+	+	+	+	-	+	++
	30%		+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+++

TABLEAU 4.25 RÉCAPITULATION DES EFFETS SUR CERTAINES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS E/L=0,40

Mélanges et dosage		Énergie de broyage	Impact environnemental	E/L = 0,40									
				Résistance à la compression (MPa)			Module d'élasticité (GPa)		Gel dégel (%)	Écaillage 56 cycles (g/m ²)		Pénétrabilité des ions Cl ⁻ (Coul.)	
				7j	28j	91j	28j	91j	14j	28j	91j	28j	91j
6×25	20%	+		-	-	-	+	+	+	+	+	+	++
	30%	+	+	--	--	-	-	-	+	-	+	+	+++
9×25	20%			-	-	-	+	+	+	+	+	+	++
	30%		+	--	--	-	-	-	+	+	+	+	+++

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif général de ce projet vise l'optimisation de la finesse et du taux d'incorporation de la poudre de verre broyé par l'évaluation de ses effets sur les performances des systèmes cimentaires binaires. À cet effet, des propriétés à l'état frais comme à l'état durci et la durabilité des systèmes cimentaires incorporant les poudres de verre broyé 6×25 et 9×25 ont été étudiées. À la lumière des résultats de cette étude, nous retenons le dosage de 30 % de poudre de verre 6×25 pour des bétons à usage courant. Toutefois, il serait préférable d'utiliser 20 % 6×25 avec le rapport E/L = 0,40 pour des ouvrages exposés aux cycles de gel-dégel en présence des sels fondants pour des raisons suivantes:

➤ Amélioration de l'ouvrabilité

Elle est de 11 % et 20 % par rapport au témoin dans les bétons incorporant 30 % de poudre de verre ayant respectivement E/L = 0,55 et 0,40. Elle est de 6 % et 8 % dans les mélanges avec 20 % de poudre de verre ayant respectivement E/L = 0,55 et 0,40. L'influence de la finesse des poudres étudiées sur l'ouvrabilité des mélanges est très faible.

➤ Dosage en superplastifiant

Il est réduit d'environ 15 % en présence de 20 ou 30 % des deux poudres de verre. Le dosage en superplastifiant n'est pas affecté par la finesse des poudres de verre étudiées.

➤ Dosage en agent entraîneur d'air (AEA)

Il est réduit de 40 % et 30 % respectivement dans les mélanges avec 30 % et 20 % de poudre de verre de rapport E/L = 0,55. Par contre il est augmenté de 28 % et 17 % respectivement dans les mélanges avec 30 % et 20 % de poudre de verre de rapport E/L = 0,40. Le dosage en AEA n'est pas influencé par la finesse de la poudre de verre.

➤ Propriétés des BAP

La viscosité plastique et le seuil de cisaillement sont diminués en présence de la poudre de verre comparativement au témoin. Les propriétés de déformabilité, la stabilité statique et la stabilité dynamique des BAP incorporant la poudre de verre sont améliorées comparativement au témoin.

➤ Réaction alcalis-granulat (RAG)

Avec 30 % de poudre de verre, l'expansion due à la RAG sur les barres de mortiers est réduite dans la limite de 0,10 %, recommandée par la norme CSA A23.2 28A. À 182 jours, l'expansion due à la RAG dans les bétons est réduite de 65 % en présence de 30 % de poudre de verre et de 50 % en présence de 20 % de poudre de verre. La résistance à la réaction alcalis-granulat est particulièrement sensible au taux d'incorporation et à la finesse de la poudre de verre. Elle augmente avec le taux d'incorporation et la finesse de la poudre de verre.

➤ Développement de résistance à la compression

À 28 jours, le développement de résistance dans les mélanges avec 30 % et 20 % de poudre de verre de rapport E/L = 0,55 est respectivement de 84 % et 86 % par rapport au témoin. Par contre, il est de 71 % et 81 % respectivement dans les mélanges avec 30 % et 20 % de poudre de verre de rapport E/L = 0,40.

À 91 jours, le développement de résistance est de 96 % et 94 % respectivement avec 30 % et 20 % de poudre de verre pour E/L = 0,55 mais de 84 % et 87 % pour E/L = 0,40. L'effet de la finesse des poudres de verre étudiées sur la résistance à la compression est assez négligeable autant dans les mélanges avec E/L = 0,55 que dans les mélanges avec E/L = 0,40. Par contre l'effet du taux d'incorporation est remarquable dans les mélanges avec E/L = 0,40 mais non significatif dans ceux avec E/L = 0,55.

➤ Résistance à l'écaillage

Le mélange avec 30 % 6×25 présente de faible résistance à l'écaillage par contre le mélange avec 30 % 9×25 présente une bonne résistance à l'écaillage. La résistance à l'écaillage est assez significativement influencée par la finesse des poudres de verre surtout dans les mélanges avec E/L = 0,55.

➤ Pénétrabilité des ions chlorures

À 28 jours, elle est réduite de 49 % et 11 % par rapport au témoin respectivement dans les mélanges avec 30 % et 20 % de poudre de verre ayant E/L = 0,55. Cette réduction de pénétrabilité dans les mélanges de rapport E/L = 0,40 contenant 30 % et 20 % de poudre de verre est respectivement de 34 % et 24 %.

À 91 jours, la pénétrabilité est réduite de 78 % et 67 % par rapport au témoin respectivement dans les mélanges avec 30 % et 20 % de poudre de verre ayant E/L = 0,55

mais de 70 % et 52 % dans ceux ayant $E/L = 0,40$. Il est à souligner la réduction considérable ou mieux exceptionnelle de la pénétrabilité des bétons incorporant de la poudre de verre pour le rapport $E/L = 0,55$. La pénétrabilité est d'autant plus faible que la finesse de la poudre augmente. Cette tendance observée est plus remarquable dans les mélanges avec $E/L = 0,55$ que dans les mélanges avec $E/L = 0,40$.

Afin de favoriser l'utilisation à grande échelle de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires, cette étude pourra être complétée par :

- ✓ Une optimisation de la compatibilité de la poudre de verre avec les adjuvants chimiques couramment utilisés sur le marché de béton.
- ✓ Une étude plus approfondie permettant d'expliquer la tendance inattendue observée sur les résultats de la résistance à l'écaillage à 28 jours et à 91 jours des mélanges avec $E/L = 0,55$. En d'autres termes, trouver une explication fondamentale de la perte de masse à l'écaillage plus élevée à 91 jours qu'à 28 jours dans ces mélanges.
- ✓ Une explication bien fondée des meilleures performances au niveau du développement de la résistance à la compression, de la résistance au gel-dégel et de la réduction de la pénétrabilité du béton en présence de la poudre de verre au rapport E/L élevé comparativement au rapport E/L faible.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI Committee 363-84 (1984). State of the Art Report on High Strength Concrete. *In* Anonyme, Detroit, MI, Detroit, MI, American Concrete Institute.
- Aitcin, P.C., Sarkar, S.L. et Laplante, P. (1990). Long-term characteristics of a very high strength concrete. *Concrete International: Design and Construction*, vol. 12, n° 1, p. 40-44.
- Aitcin, P., Malhotra, V.M., Carette, G.G., Pistilli, M.F. et Wolsiefer, J.T. (1987). Silica fume in concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 84, n° 2, p. 158-166.
- Al-Amoudi, O.S.B. (1994). Performance of plain and blended cements in high chlorides environments. *In* Anonyme, (p. 539-555), Nice, France, 23 mai.
- Asbridge, A.H., Page, C.L. et Page, M.M. (2002). Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars. *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 9, p. 1365-1369.
- Assaad, J., Khayat, K.H. et Daczko, J. (2004). Evaluation of static stability of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 101, n° 3, p. 207-215.
- Baraett, S.J., Soutsos, M.N., Bungey, J.H. et Millard, S.G. (2005). The effect of ground granulated blastfurnace slag on the strength development and adiabatic temperature rise of concrete mixes. *In* Dhir, R.K., Harrison, T. et Newlands, M., *2005 International Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities* (p. 165-172), Dundee, Scotland, United Kingdom, Jul 5-7 2005. London, E14 4JD, United Kingdom, Thomas Telford Services Ltd.
- Bartos, P.J.M. (1998). An Appraisal of the Orimet Test as a Method for On-Site Assessment of Fresh SCC Concrete. *In* Anonyme, (p. 121-135), Japan,
- Beaupré, D. (1994). *Rheology of High Performance Shotcrete*. Thèse de Doctorat Ph.D, University of British Columbia, University of British Columbia, CANADA, 249 p.
- Bouzoubaa, N., Zhang, M.H. et Malhotra, V.M. (2001). Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 10, p. 1393-1402.

-
- Brooks, S.A. et Sharp, J.H. (1990). Ettringite-based cements, Calcium Aluminate Cements, Ed. R.J. Mangabhai, Proc. Int. Symp., Queen Mary and Wsetfield College, p. 335-349.
- CAN/CSA A23.3-M84 (1984). Design of concrete structures. In Anonyme, Cur, R. (s.d). *Fly ash as addition to concrete*. Center for Civil Engineering Research and Codes édition, Gouda, The Netherlands, 144, p. 99.
- Dubovoy, V.S., Gebler, S.H., Klieger, P. et Whiting, D.A. (1986). Effects of ground granulated blast-furnace slags on some properties of pastes, mortars, and concretes. In Anonyme, *Blended Cements*.(p. 29-48), Philadelphia, PA, USA, ASTM.
- Duval, A. et Bouguillon, A. (s.d). *La microscopie électronique à balayage*. Laboratoire de recherche des musées de France édition,
- Eberhart, J.P. (1997). *Analyse structurale et chimique des matériaux*. Dunod, Paris,
- Elaguab, M.Y. (2007). *Comportement rhéologique et pressions latérales des bétons autoplaçants sur les coffrages = Rheological behaviour and formwork pressure of self-consolidating concrete*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 191 p.
- Eren, O., Brooks, J.J. et Celik, T. (1995). Setting times of fly ash and slag-cement concretes as affected by curing temperature. *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 17, n° 1, p. 11-17.
- Fares, G. (2008). Nouveau Système Cimentaire: cas de la fritte de verre. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 289 p
- Feldman, R.F. et Cheng-yi, H. (1985). Resistance of mortars containing silica fume to attack by a solution containing chlorides. *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n° 3, p. 411-420.
- Fournier, B. (s.d). *Réaction alcalis-granulats dans les bétons - Revues des concepts de base et implications d'ingénieries*. CANMET Materials Technology Laboratory édition,
- Frias, M. et Cabrera, J. (2000). Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 4, p. 561-569.
- Gagné, R. (1992). *La durabilité au gel des bétons à hautes performances*. Thèse de doctorat, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 433 p.
-

-
- Gallias, J.L., Kara-Ali, R. et Bigas, J.P. (2000). Effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 10, p. 1543-1549.
- Gao, P., Lu, X., Yang, C., Li, X., Shi, N. et Jin, S. (2008). Microstructure and pore structure of concrete mixed with superfine phosphorous slag and superplasticizer. *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 5, p. 837-40.
- Guneyisi, E., Gesoglu, M. et Mermerdas, K. (2008). Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 41, n° 5, p. 937-949.
- Hasni, L. (1999). *Bétons Autoplaçants*. Rapport de recherche présenté aux journées du PN BAP édition, 98-004/98-006,
- Hasparyk, N.P., Monteiro, P.J.M. et Carasek, H. (2000). Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 4, p. 486-492.
- Hassan, M.M., Mahmoud, G.A., El-Nahas, H.H. et Hegazy, E.-A. (2007). Reinforced material from reclaimed rubber/natural rubber, using electron beam and thermal treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 104, n° 4, p. 2569-78.
- Held, M. et Konig, G. (1992). Hochfester Beton bis B 125 - ein geeigneter Baustoff fuer hochbelastete Druckglieder; High strength concrete up to B 125 - a suitable construction material for compressed members subjected to high loads. *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 87, n° 2, p. 41-45.
- Helmuth, R.A. (1982). Short-term R&D Opportunities. In Anonyme, *Workshop Proceedings: Research and Development Needs for Use of Fly Ash in Cement and Concrete*. (p. 4-26), Palo Alto, Calif, USA, EPRI.
- Helmuth, R.A. (1986). Water-reducing properties of fly ash in cement pastes, mortars, and concretes; Causes and test methods. In Anonyme, *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete* (p. 723-740), Proceedings - Second International Conference. Detroit, MI, USA, American Concrete Inst.
- Hester, D., McNally, C. et Richardson, M. (2005). A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 19, n° 9, p. 661-665.
- Huang, C. et Feldman, R.F. (1985). Hydration reactions in Portland cement-silica fume blends. *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n° 4, p. 585-592.
-

-
- Hussain, S.E. et Rasheeduzzafar (1994). Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 91, n° 3, p. 264-272.
- Hwang, S. (2006). *Performance des bétons autoplaçants développés pour la réparation des infrastructures en béton*. Thèse de Doctorat (Ph.D), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 347 p.
- Irdon, G.M. (1983). The effect of slag cement in concrete. *NRMCA*, n° 167, p. 10.
- Jonquieres, A. *Pychnomètre à hélium*. Spécification Techniques édition, Université de Nancy,
- Khayat, K.H. (2001). *Technologie avancée du béton*. Université de Sherbrooke, Qc, Canada, Notes de cours.
- Khayat, K.H. et Aitcin, P.C. (1992). Silica fume in concrete - an overview, in Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. In Malhotra, V.M., (p. 835-872), ACI SP-132.
- Khayat, K.H. (1998). Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - an overview. *Cement & Concrete Composites*, vol. 20, n° 2-3, p. 171-188.
- Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S. et Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 20, n° 9, p. 744-753.
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., Norman, F. et McGrath, R.J. (2003). *Dosage et contrôle des mélanges de béton*. 7^e édition édition, Ottawa, Ontario, Canada, Association Canadienne du ciment, 308 p. EB 101.
- Kou, S. et Poon, C.S. (2006). Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, vol. 21, n° 4, p. 130-136.
- Laldji, S. et Tagnit-hamou, A. (2003). *Étude de l'utilisation de la CAISifrit dans les bétons*. Université de sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Rapport de recherche,
- Laldji, S. et Tagnit-Hamou, A. (2006). Properties of ternary and quaternary concrete incorporating new alternative cementitious material. *ACI Materials Journal*, vol. 103, n° 2, p. 83-89.
- Laldji, S. et Wentzell, J. (2007a). Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les bétons. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Présentation des travaux des axes de recherche 1 et 5 de la chaire SAQ de valorisation du verre dans les matériaux.
-

-
- Laldji, S. et Tagnit-Hamou, A. (2007b). Glass frit for concrete structures: A new, alternative cementitious material. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, n° 7, p. 793-802.
- Langlois (1986). *Relations entre les caractéristiques des vides d'air et la durabilité des bétons usuels soumis à des longs cycles de gel-dégel*. Mémoire de maîtrise, Université de Laval, Sainte Foy, Québec,
- Lemieux, G. (2008). *Effets de la composition et des paramètres de mélange sur la performance des bétons autoplacants utilisés pour la préfabrication d'éléments précontraints = Effects of mix design and parameters on performance of self-consolidating concrete used in precast, prestressed applications*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 234 p.
- Lovric, D. (2005). *Optimisation coûtsperformances des bétons autoplacants : utilisation des fillers et cendres volantes*. Mémoire de maîtrise, S.N., Sherbrooke, Québec, 170 p.
- Malhotra, V.M., Zhang, M., Read, P.H. et Ryell, J. (2000). Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength/high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions. *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 5, p. 518-525.
- Manai, K. (1995). *Étude De L'effet D'ajouts Chimiques Et Minéraux Sur La Maniabilité, La Stabilité Et Les Performances Des Bétons Autonivelants*. S.I., (Collection Thèses canadiennes).
- Martin, J.L. et George, A. (1998). Caractérisation expérimentale des matériaux-II. *In Anonyme, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*.
- Mehta, P.K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *In Anonyme, (p. 61-66), Concrete International*.
- Ming-Yu Lee, Chun-Han Ko, Fang-Chih Chang, Shang-Lien Lo, Jyh-Dong Lin, Ming-Yang Shan et Jeng-Ching Lee (2008). Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n° 7, p. 583-7.
- Miura, T. et Iwaki, I. (2000). Strength development of concrete incorporating high levels of ground granulated blast-furnace slag at low temperatures. *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 1, p. 66-70.
- Naik, T.R. et Ramme, B.W. (1990). Effects of high-lime fly ash content on water demand, time of set, and compressive strength of concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 87, n° 6, p. 619-626.
-

-
- Nehdi, M. (1995). The microfiller effect in high performance concrete. *Research Proposal*,
- Nehdi, M. (2001). Ternary and quaternary cements for sustainable development. *In Anonyme*, (p. 35-42), Concrete International.
- Nehdi, M., Mindess, S. et Aitcin, P.-. (1997). Statistical modelling of the microfiller effect on the rheology of composite cement pastes. *Advances in Cement Research*, vol. 9, n° 33, p. 37-46.
- Neville, M.A. (2000). *Propriétés des bétons*. Eyrolles édition, Paris, 806 p.
- Nkinamubanzi, P.C. et Aitcin, P.C. (1999). The use of slag in cement and concrete in a sustainable development perspective. *In Anonyme*, 30-31 mars. E. Marciano, Montréal, Qc, WABE International Symposium on Cement and Concrete.
- Ozawa, K., Kunishima, M., Maekawa, K. et Okamura, H. (1991). Challenge for high performance concrete. *In Anonyme*, (p. 5-17), University of Tokyo, Proc. Conf. On high performance.
- Phillippon, J. (s.d). *La diffraction des rayons X*. Mission de la recherche et de la technologie édition,
- Phoummavong (s.d). *Cours des matériaux de construction*.
- Pigeon, M., Aitcin, P. et Laplante, P. (1987). Comparative study of air-void stability in a normal and a condensed silica fume field concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 84, n° 3, p. 194-199.
- Pigeon, M., Pleau, R. et Aitcin, P. (1986). Freeze-thaw durability of concrete with and without silica fume in ASTM C666 (Procedure A) Test Method: Internal cracking versus scaling. *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 8, n° 2, p. 76-85.
- Pinsonneault, P. et Aitcin, P.C. (1983). L'utilisation des ajoux minéraux dans le béton. *In Anonyme*, Ottawa, Ontario, Séminaire Progress in Concrete.
- Poon, C.S., Kou, S.C. et Lam, L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 20, n° 10, p. 858-865.
- Poon, C.S., Shui, Z.H. et Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, vol. 18, n° 6, p. 461-468.
- Ramachandran, V.S. (1984). Properties Science and Technology. *Ed. Concrete Admixtures Handbook*, p. 626.
-

-
- Ramlochan, T., Thomas, M. et Gruber, K.A. (2000). Effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 3, p. 339-344.
- Rasheeduzzafar, Al-Saadoun, S.S. et Al-Gahtani, A.S. (1992). Reinforcement corrosion-resisting characteristics of silica-fume blended-cement concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 89, n° 4, p. 337-366.
- Rasheeduzzafar et Ehtesham Hussain, S. (1991). Effect of microsilica and blast furnace slag on pore solution composition and alkali-silica reaction. *Cement & Concrete Composites*, vol. 13, n° 3, p. 219-225.
- Sargolzahi, M. (2005). *Optimisation du verre mixte dans le béton de qualité*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 95 p.
- Saric-Coric, M. (2001). Interactions superplastifiant – laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 291 p.
- Sarkar, S., Aitcin, P. et Djellouli, H. (1990). Synergistic roles of slag and silica fume in very high-strength concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 12, n° 1, p. 32-37.
- Schwarz, N., Cam, H. et Neithalath, N. (2008b). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n° 6, p. 486-96.
- Schwarz, N. et Neithalath, N. (2008a). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 4, p. 429-36.
- 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*, vol. 29, n° 9, p. 656-666.
- Shayan, A. et Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 1, p. 81-89.
- 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*, vol. 36, n° 3, p. 457-468.
- Shi, C. et Wu, Y. (2005a). Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. *ACI Materials Journal*, vol. 102, n° 5, p. 355-363.
-

-
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. et Wang, H. (2005b). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 5, p. 987-993.
- Shi, Y., Matsui, I. et Feng, N. (2006). A Investigation on the influence of vitreous slag powders on rheological properties of fresh concrete. *Key Engineering Materials*, vol. 302-303, p. 223-229.
- Snelson, D.G., Wild, S. et O'Farrell, M. (2008). Heat of hydration of Portland Cement-Metakaolin-Fly ash (PC-MK-PFA) blends. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 6, p. 832-840.
- Tagnit-hamou, A. (2007). *Liants hydrauliques*. Université de Sherbrooke, Qc, Canada, Notes de cours.
- Tagnit-hamou, A. et Laldji, S. (2004). Development of new binder using thermally-treated spend pot liners from aluminium smelters. *Recycling Concrete and Other Materials for sustainable development*, p. 144-159.
- Taha, B. et Nounu, G. (2008a). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 5, p. 713-720.
- Taha, B. et Nounu, G. (2008b). Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n° 6, p. 497-505.
- Tchieme, F.J. (2008). *Utilisation des carbonates de calcium manufacturés dans les bétons autoplaçants*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 158 p.
- Terrier, P. (2005). *TCH 006 Matériaux - Compression et flexion du béton*. Cours de transition en technologie, Service des enseignements généraux édition,
- Tremblay, S. (2000). *Étude Sur La Rhéologie Des Bétons Autoplaçants Et Comportement À la compression De Poteaux En Béton Autoplaçant Confiné*. M.Sc.A, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 133 p.
- Trudel, A. (1996). *Maniabilité, uniformité et comportement structural du béton autonivelant à haute performance*. M.Sc.A, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 198 p.
- Tumidajski, P.J. (2006). Effect of slag, silica fume, and finishing on the sorptivities of field concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 33, n° 8, p. 1022-1026.
-

-
- Turgut, P. (2008). Limestone dust and glass powder wastes as new brick material. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 41, n° 5, p. 805-813.
- Wang, J.C. et Yan, P.Y. (2006). Influence of initial casting temperature and dosage of fly ash on hydration heat evolution of concrete under adiabatic condition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 85, n° 3, p. 755-760.
- Xiaofeng, C., Shanglong, G., Darwin, D. et McCabe, S.L. (1992). Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar, and concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 89, n° 4, p. 375-387.
- Yamamoto, K., Morioka, M., Maeda, Y., Chikada, T., Sakai, E. et Matsushita, H. (2007). Properties of high fluidity concrete with combination of fine powder of slowly cooled blast furnace slag and granulated blast furnace slag. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan*, vol. 56, n° 2, p. 182-189.
- Yan, L., Shuhe, Z. et Liancheng, Z. (2007). Effect of metakaolin powder on durability of concrete. *Cement Engineering*, n° 3, p. 69-72.
- Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M. et Sakai, G. (1993). Mix proportions for highly workable concrete. In Anonyme, *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000: Economic and Durable Construction through Excellence* (p. 579), Sep 7-9 1993. London, Engl, Publ by E. & F.N. Spon.
- Zielinska, E. (1972). The influence of carbonate calcium on the hydration process in some Portland cement constituents. *Prace Instytutu Technologii i Organizacji Produkcji Budowlanej*, vol. 3,

ANNEXES

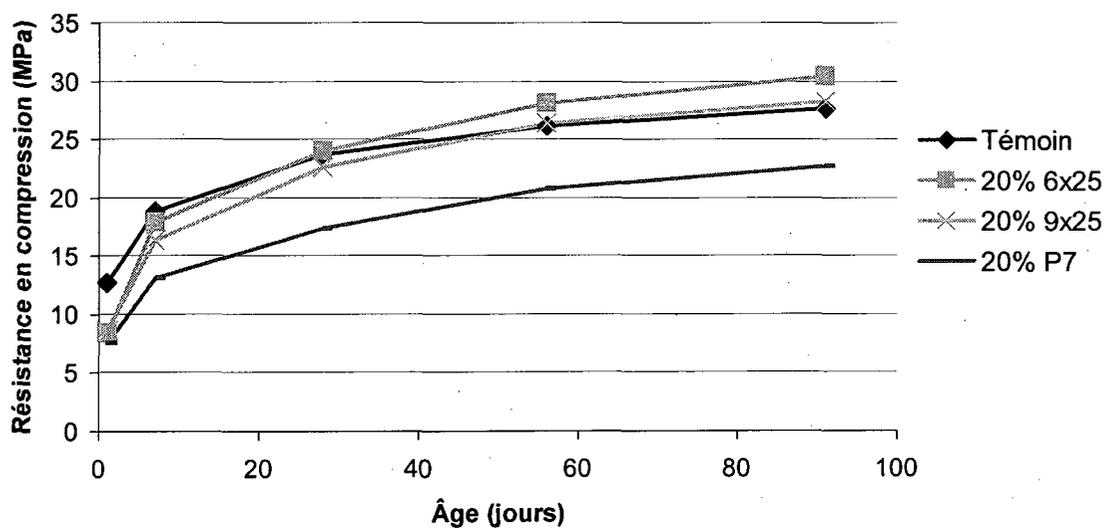
RÉSULTATS D'OPTIMISATION DE LA POUDRE DE VERRE DANS LES BÉTONS CONVENTIONNELS ET À HAUTES PERFORMANCES

ANNEXE I DOSAGE EN AEA ET PROPRIÉTÉS À L'ÉTAT FRAIS DES BÉTONS E/L = 0,55

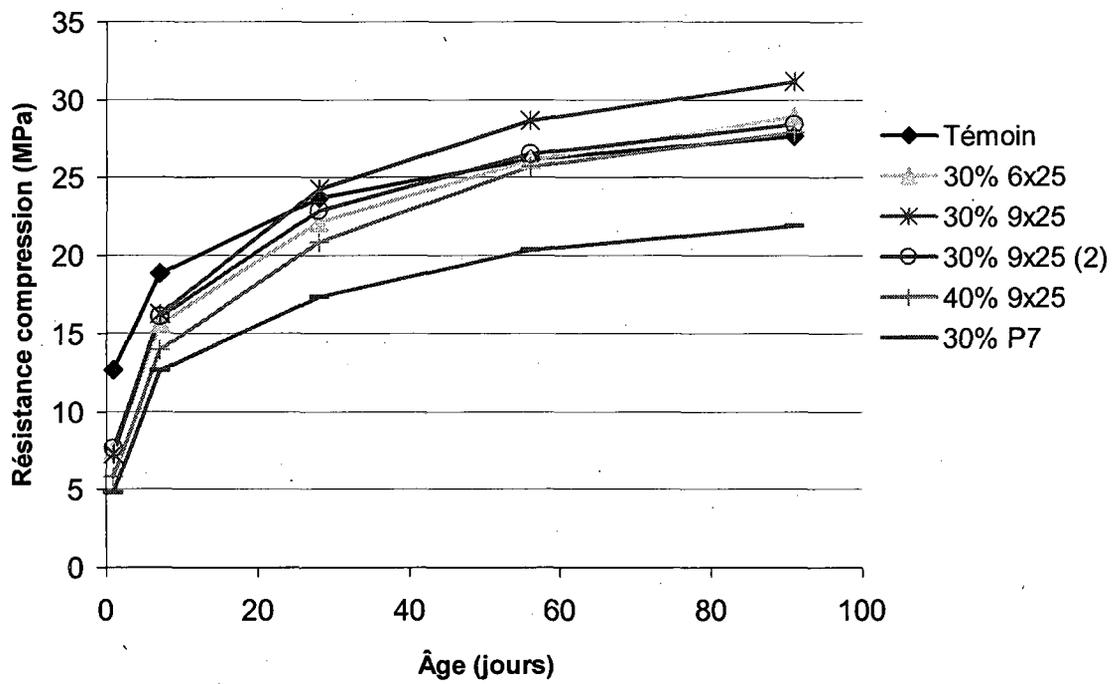
Grandeurs mesurées	Temps	Témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25				Poussière	
			20%	30%	20%	30%	30%2	40%	20%	30%
Airex-L (ml/100kg)	-	80,00	57,14	57,14	57,14	45,71	57,14	57,14	0,00	0,00
Air (%)	10min	7,2	5,8	6,6	6,5	6,6	5,7	5,8	7,8	7,6
	30min	7,2	5,4	6,6	6,0	6,0	5,7	5,6	7,8	7,2
Affaissement (mm)	10min	170	200	180	190	200	180	180	125	130
	30min	165	180	165	170	175	150	180	115	110
Masse volumique (kg/m ³)	10min	2200	2272	2230	2224	2230	2265	2263	2195	2197
	30min	2214	2272	2243	2245	2241	2268	2264	2192	2204
Température (°C)	10min	23,5	22,3	22,8	22,6	22,6	22,9	22,9	23,4	23,1
	30min	23,6	22,2	22,6	22,4	22,3	22,7	23,5	23,1	22,9

ANNEXE 2 RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES BÉTONS E/L = 0,55

Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)								
	témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25				Poussière	
		20%	30%	20%	30%	30% 2	40%	20%	30%
1	12,7	8,4	7,5	8,6	7,3	7,6	5,8	7,5	4,8
7	18,8	17,9	15,7	16,4	16,3	16,1	13,9	13,1	12,6
28	23,7	24,0	22,2	22,6	24,3	22,9	20,9	17,3	17,3
56	26,2	28,1	26,1	26,4	28,7	26,6	25,7	20,7	20,4
91	27,7	30,4	29,0	28,3	31,2	28,4	27,9	22,7	21,9



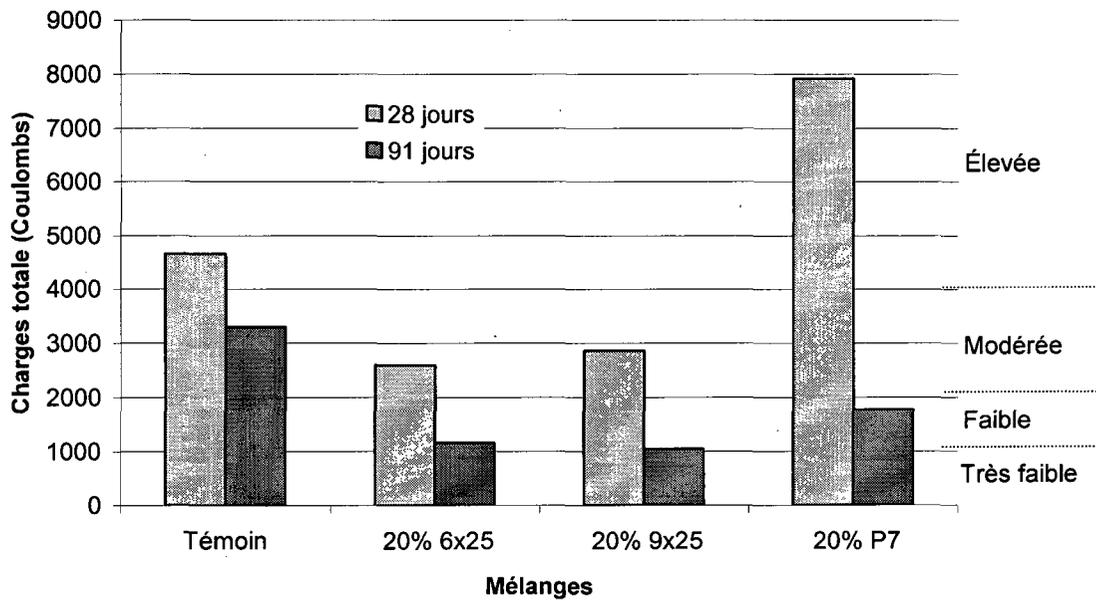
Résistance à la compression des mélanges témoin et 20% poudres E/L=0,55



Résistance à la compression des mélanges témoin et 30% poudres E/L=0,55

ANNEXE 3 PÉNÉTRABILITÉ DES IONS CHLORURES DES BÉTONS $E/L = 0,55$

Âges (jours)	Charges moyennes (Coulombs)			
	Témoin	20% 6×25	20% 9×25	20% P7
28	4661	2596	2865	7926
91	3302	1163	1044	1769



Pénétrabilité aux ions chlore des mélanges témoin et 20% poudres $E/L=0,55$

ANNEXE 4 DOSAGE EN ADJUVANTS CHIMIQUES ET PROPRIÉTÉS À L'ÉTAT
FRAIS DES BÉTONS E/L = 0,40

Grandeurs mesurées	Temp s	Témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25			Poussière		
			20%	30%	20%	30%	30%2	20%	20%2*	30%
Airex-L (ml/100kg)	-	170	200	260	200	280	260	250	320	500
SP Disal (g) (%extract sec)	-	150 (0,63)	150 (0,63)	147,6 (0,62)	150 (0,63)	147,6 (0,62)	147,6 (0,62)	270 (1,14)	105 (0,33)	360 (1,51)
Air (%)	10min	5,9	5,6	6,8	5,9	8,6	7,8	6,0	6,3	6,3
	30min	4,0	3,7	4,5	4,7	7,0	5,7	6,1	4,8	4,6
Affaissement (mm)	10min	215	210	220	210	220	225	160	230	230
	30min	160	175	210	200	190	210	215§	225	225
Masse volumique (kg/m ³)	10min	2312	2330	2270	2326	2228	2263	2305	2281	2314
	30min	2371	2363	2356	2354	2288	2318	2302	2333	2349
Température (°C)	10min	26,2	24,5	25,4	25,5	24,5	24,5	22,8	22,2	21,8
	30min	26,2	24,5	24,7	25	24,5	24	22,2	22,3	22,2

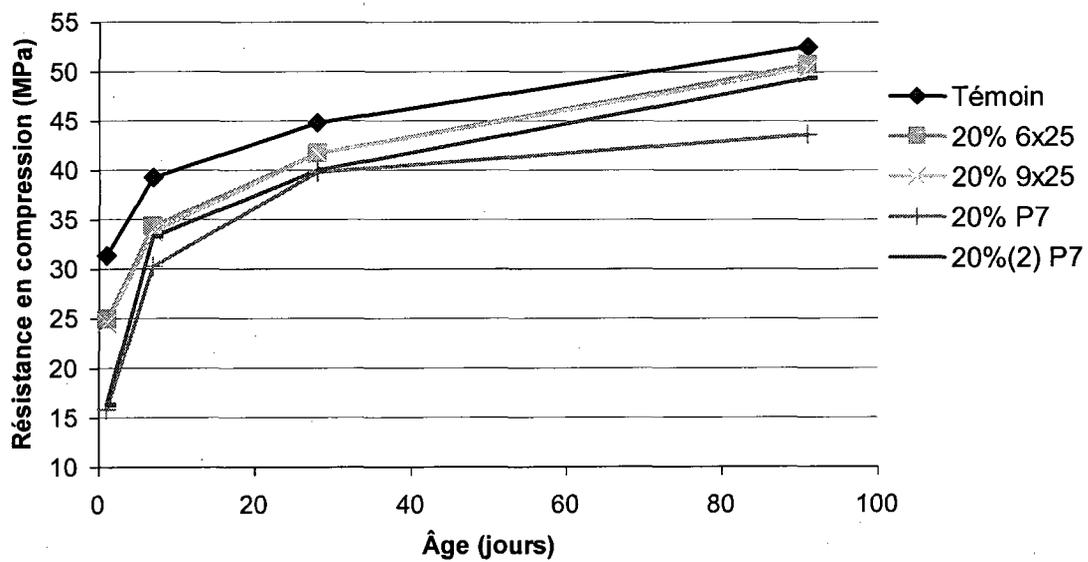
2* SP est le Plastol

§ Ajout de 30g de SP avant la mesure d'affaissement à 30 minutes

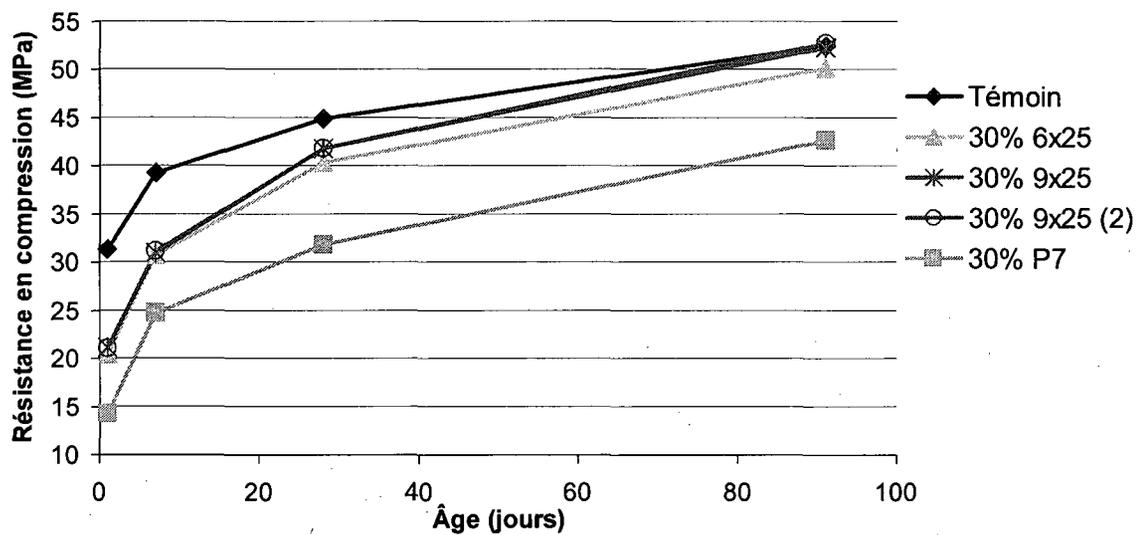
ANNEXE 5 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS E/L = 0,40

Age (j)	Résistance à la compression (MPa)								
	Témoin	Poudre 6×25		Poudre 9×25			Poussière		
		20%	30%	20%	30%	30% (2)	20%	20% *	30%
1	31,4	25,0	20,5	24,6	21,1	21,0	15,8	16,3	14,2
7	39,3	34,4	30,8	33,8	31,0	31,2	30,3	33,3	24,7
28	44,9	41,7	40,3	41,8	41,8	41,8	39,8	40,0	31,8
91	52,5	50,7	50,2	50,4	52,3	52,8	45,3	49,4	42,6

* On a utilisé un superplastifiant Plastol au lieu du Disal pour tous les autres mélanges



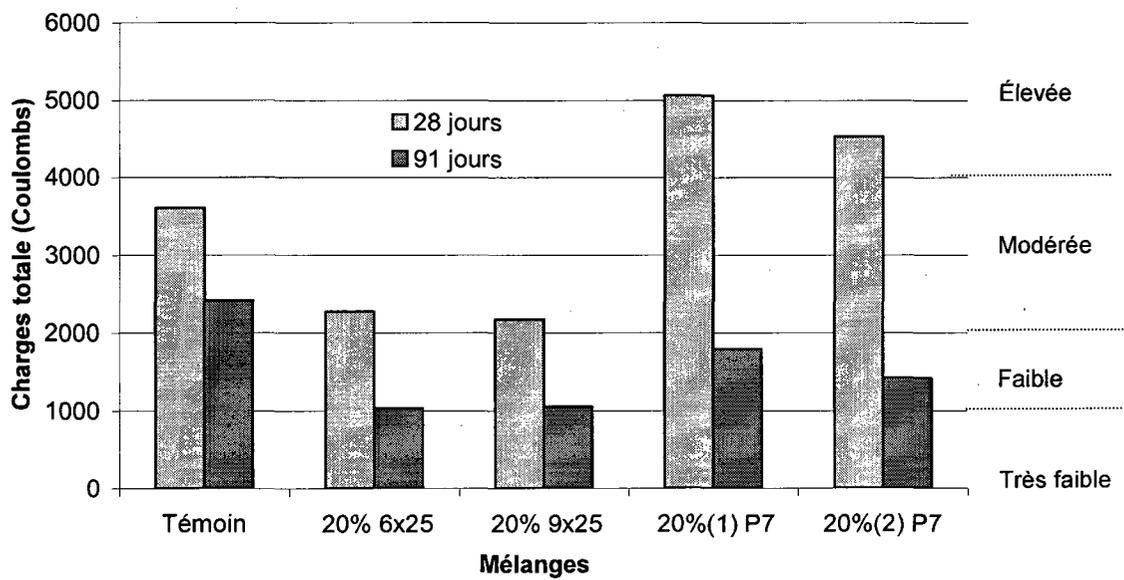
Résistance à la compression des mélanges témoin et 20% poudres E/L=0,40



Résistance à la compression des mélanges témoin et 30% poudres E/L=0,40

ANNEXE 6 PÉNÉTRABILITÉ DES IONS CHLORURES DES BÉTONS E/L = 0,40

Âges (jours)	Charges moyennes (Coulombs)				
	Témoin	20% 6x25	20% 9x25	20%(1) Poussière	20%(2) Poussière
28	3608	2275	2175	5063	4532
91	2412	1032	1051	1796	1422



Pénétrabilité aux ions chlore des mélanges témoin et 20% poudres F/I=0,40