



Faculté de génie

Département de génie civil

Optimisation et Performance des Bétons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland

Mémoire de maîtrise en génie civil

Directeur de recherche : Arezki Tagnit-Hamou

Co directeur de recherche : Ammar Yahia

Membres de jury : Pierre-Claver Nkinamubanzi (Évaluateur externe)

Radhouane Masmoudi (Rapporteur)

Aly Hussein Abdalla

Mai 2012

Sherbrooke (Québec), Canada

IV-2267



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: 978-0-494-93310-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-93310-7

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 cimentaires tel que, la fumée de silice, les cendres volantes et les laitiers est une activité courante au Canada en raison des conditions climatiques sévères. Au Québec, ces matériaux ne sont pas disponibles, ce qui implique leur transport sur des distances considérables. La poudre de verre est un matériau pouzzolanique fabriqué au Québec et présente ainsi l'avantage de remplacer partiellement ces matériaux cimentaires. Il est rapporté qu'un taux de remplacement partiel de 20% du ciment portland par la poudre de verre a des effets bénéfiques sur le développement des propriétés mécaniques et sur la durabilité du béton. Le taux d'incorporation optimal de la poudre de verre peut varier en fonction du rapport E/L, le dosage en liant et leur interaction. Il est difficile de déterminer l'effet de l'interaction entre les paramètres de formulation sur les propriétés du béton par les méthodes conventionnelles. Alors, un plan factoriel composite à deux niveaux a été conçu pour déterminer l'effet des trois facteurs, ainsi que de leurs interactions sur les résistances en compression et la perméabilité aux ions chlore aux différents âges. Les facteurs modélisés dans ce plan factoriel sont; le rapport E/L, le taux d'incorporation de verre et le dosage en liant (kg/m^3). Tous les modèles statistiques sont valides pour des rapports E/L entre 0,35 et 0,60, des pourcentages de la poudre de verre entre 10% et 40% et des dosages en liant entre 335 kg/m^3 et 415 kg/m^3 .

Des mélanges de validation sont utilisés pour évaluer la fiabilité des modèles proposés. Le rapport entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées se situe entre 0,83 et 1,15 ce qui indique une bonne fiabilité des modèles proposés. Le rapport E/L est le paramètre qui a le plus d'influence sur la résistance en compression à tous les âges et sur la perméabilité aux ions chlorures à 28 jours. Par contre, le taux d'incorporation de la Poudre de verre a le plus d'influence sur la perméabilité aux ions chlore à 56, 91 et 180 jours grâce à la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre. Des courbes iso-réponses sont établis pour comprendre l'évolution des propriétés du béton en fonction des différents paramètres de formulation. Elles montrent que l'incorporation de 20% de la poudre de verre aux bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 procure une perméabilité aux ions chlorures inférieure à 1500 Coulombs à 56 jours. Cette valeur de perméabilité peut être obtenue à 56 jours en remplaçant 30% du ciment par la poudre de verre quelque soit le rapport E/L considéré. Une valeur de la résistance en compression à 28 jours de 35 MPa peut être obtenue en utilisant des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de poudre de verre. Cette valeur de la résistance à 28 jours peut être obtenue aussi avec des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,42 et contenant 30% de poudre de verre.

Des mélanges binaires et ternaires proportionnés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant de la poudre de verre affichent des bonnes propriétés mécaniques, ainsi que des bonnes caractéristiques de durabilité dans les milieux agressifs. Ces bétons développent des gains significatifs des propriétés mécaniques entre 28 et 91 jours. L'utilisation de la poudre de verre comme un ajout cimentaire alternatif présente une avenue très intéressante pour avoir des bétons durables et économiques.

Mots-clés : Plan factoriel composite, Résistance en compression, Perméabilité aux ions chlorures, Propriétés mécaniques, Durabilité, Coût unitaire du béton.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Département de génie civil à l'Université de Sherbrooke dans le cadre de la Chaire industrielle en valorisation des matériaux dans le béton (SAQ).

Je tiens tout d'abord à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon directeur de recherche, Arezki Tagnit-Hamou, professeur à l'université de Sherbrooke et titulaire de la Chaire industrielle en valorisation des matériaux dans le béton, pour ses directives et ses conseils pertinents tout au long de cette étude. Son esprit critique et scientifique restera pour moi un modèle dans la vie.

Je tiens à remercier vivement mon co-directeur de recherche, Ammar Yahia, professeur à l'Université de Sherbrooke, pour son entière disponibilité et ses conseils précieux pendant la réalisation du programme expérimental.

Je tiens à remercier particulièrement, Abdelkrim Bengougam, professionnel de recherche à l'Université de Sherbrooke, ainsi que, Yves-Ablam Zidol, étudiant au doctorat à l'Université de Sherbrooke, pour leur soutien tout au long de ce travail.

Je voudrais exprimer mes remerciements à tous les autres chercheurs et le personnel du Groupe béton. Je tiens à remercier tous les techniciens, Ghislaine Luc, Denis Bolduc, Rajko Vojnovic, Sylvain Roy, Johan Jass et Claude Faucher pour leur collaboration et leurs conseils tout au long des travaux au laboratoire.

Je remercie chaleureusement tous les étudiants gradués au sein du Groupe de recherche sur le ciment et le béton à l'Université de Sherbrooke. Je remercie également mes amis, Cristian Sotomayor, étudiant à la maîtrise à l'Université de Sherbrooke et Wael Abdelmeguid, stagiaire postdoctoral à l'Université de Sherbrooke, pour leurs conseils utiles pendant la réalisation de ce travail.

J'adresse mes profonds remerciements à mon Dieu pour ses œuvres palpables dans ma vie et à mes parents et mes sœurs pour leur soutien et encouragement pendant la réalisation de ce travail.

Tableau des matières

Chapitre 1 - Introduction.....	1
Chapitre 2 – La recherche bibliographique.....	3
2.1 Propriétés à l'état frais	3
2.2 Propriétés à l'état durci	4
2.2.1 Résistance en compression.....	4
2.2.2 Résistance en traction.....	10
2.2.3 Résistance en flexion	12
2.2.4 Le module d'élasticité.....	14
2.2.5 La perméabilité aux ions chlore	16
2.2.6 Résistance aux cycles de gel-dégel	19
2.2.7 Résistance à l'écaillage.....	21
2.2.8 Retrait du béton.....	24
2.3 Synthèse de la recherche bibliographique.....	29
Chapitre 3 – Le programme expérimental et les procédures d'essais	30
3.1 Le programme expérimental	30
3.1.1 Phase 1 : Effet des différents paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton incorporant de la poudre de verre	30
3.1.2 Phase 2 : Caractérisation et durabilité des mélanges optimisés	31
3.2 La méthode des plans d'expériences.....	32
3.2.1 Les plans factoriels composites à deux niveaux.....	32
3.2.2 La validation des modèles statistiques	36
3.2.3 Exploitation des modèles statistiques.....	38
3.3 Les procédures d'essais.....	38
3.3.1 Essais sur le béton à l'état frais	40
3.3.2 Essais sur le béton à l'état durci.....	43
Chapitre 4 – Matériaux utilisés	51
4.1 Les Granulats	51
4.1.1 Les granulats fins	51
4.1.2 Les gros granulats	52
4.2 L'eau de gâchage	54
4.3 Le ciment	54
4.4 Les ajouts cimentaires.....	55

4.4.1	La fumée de silice	55
4.4.2	La poudre de verre	55
4.5	Les adjuvants	56
4.6	Composition du béton	58
Chapitre 5 - Résultats et Discussions		62
5.1	Phase 1 (Effet des paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton incorporant de la poudre de verre)	62
5.1.1	Résultats expérimentaux	62
5.1.2	Présentation des modèles statistiques.....	64
5.1.3	Validation des modèles statistiques	72
5.1.4	Exploitation des modèles statistiques.....	84
5.1.5	Optimisation économique des mélanges du béton incorporant du verre.....	101
5.1.6	Conclusions des résultats de la phase 1.....	107
5.2	Phase 2 - Caractérisation et durabilité des mélanges optimisés.....	109
5.2.1	Propriétés des mélanges à l'état frais	109
5.2.2	Résistance en compression.....	110
5.2.3	Résistance en traction.....	115
5.2.4	Résistance en flexion	118
5.2.5	Module d'élasticité.....	121
5.2.6	Perméabilité aux ions chlorures.....	124
5.2.7	Résistances aux cycles de gel-dégel.....	127
5.2.8	Résistance à l'écaillage	128
5.2.9	Retrait au séchage	131
5.2.10	Optimisation économique des mélanges.....	133
5.2.11	Conclusions des résultats de la phase 2.....	136
Conclusions et Recommandations		139
Phase 1		139
Phase 2		140
Liste de Références.....		141
Annexe 1		149
Annexe 2		166

Liste des Figures

Figure 2-1: Résistances en compression des bétons incorporant 30% de poudre de verre [Shao et al., 2000]	5
Figure 2-2 : Résistance en compression [Schwarz et al., 2008].....	6
Figure 2-3: La résistance en compression des bétons incorporant de la poudre de verre en comparaison avec celle du béton témoin [Shayan et al., 2004]	7
Figure 2-4: Résistance en compression pour les bétons avec E/L de 0,55[Zidol, 2009]	
8	
Figure 2-5 : Résistance en compression pour les BHP avec un rapport E/L de 0,40 [Zidol, 2009]	9
Figure 2-6 : Résistance en traction à 28 jours [Taha et al., 2008].....	10
Figure 2-7 : Résistance en traction pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 [Zidol, 2009].....	11
Figure 2-8 : Résistance en flexion à 130 jours [Shayan et al., 2006].....	12
Figure 2-9 : Résistance en flexion pour les bétons à haute performance [Zidol, 2009].....	14
Figure 2-10: Module d'élasticité pour des bétons conventionnels [Shayan et al., 2006].	15
Figure 2-11: Les charges totales passées en Coulomb [Jain et al., 2010]	17
Figure 2-12: La perméabilité aux ions chlores pour les bétons conventionnels (E/L = 0,55) [Zidol, 2009].	18
Figure 2-13: La perméabilité aux ions chlores pour les BHP (E/L=0,40) [Zidol, 2009].	19
Figure 2-14: Écaillage des mélanges après 28 jours de mûrissement (E/L=0,40) [Aladdine, 2009].....	24
Figure 2-15: Retrait au séchage pour des bétons incorporant de la poudre de verre [Shayan et al., 2004]	27
Figure 2-16: Retrait au séchage pour différents bétons [Shayan et al., 2006]	27
Figure 2-17: Retrait au séchage pour des bétons à haute performance (E/L=0,40) [Zidol, 2009].....	28
Figure 3-1: Le plan factoriel composite à deux niveaux utilisé dans cette étude.....	33
Figure 3-2: Mesure de l'affaissement du béton selon les normes ASTM C143	41
Figure 3-3: Mesure de la teneur en air du béton frais	42
Figure 3-4: Mesure de la masse volumique du béton à l'état frais	43
Figure 3-5: L'essai de la résistance en traction selon la norme ASTM C496	44
Figure 3-6: L'essai de la résistance en flexion selon la norme ASTM C78	45
Figure 3-7: Principe de fonctionnement de l'appareil de la diffusion accéléré des ions chlores ASTM C1202.....	47
Figure 3-8: Mesure du retrait au séchage (ASTM C157)	50
Figure 4-1: La courbe granulométrique du sable	52
Figure 4-2: La courbe granulométrique des granulats 5-14 mm	53
Figure 4-3: La courbe granulométrique combinée des gros granulats	54
Figure 4-4: La courbe granulométrique de ciment GU	57
Figure 4-5: La courbe granulométrique de la poudre de verre.....	57
Figure 5-1: Validation de la résistance en compression à 1 jour	77
Figure 5-2: Validation de la résistance en compression à 28 jours	78
Figure 5-3: Validation de la résistance en compression à 91 jours	79
Figure 5-4: Validation de la résistance en compression à 1 an	80

Figure 5-5: Validation de la perméabilité aux ions chlorés à 28 jours.....	81
Figure 5-6: Validation de la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours.....	82
Figure 5-7: Validation pour la perméabilité aux ions chlorés à 91 jours.....	83
Figure 5-8: Iso-réponse de la résistance en compression à 1 jour en fonction du E/L et %PV	85
Figure 5-9: Iso-réponse de la résistance en compression à 7 jours en fonction de rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre.....	87
Figure 5-10: Iso-réponse pour la résistance en compression à 28 jours en fonction de rapport E/L et %PV	89
Figure 5-11: Iso-réponse pour la résistance en compression à 91 jours en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre	91
Figure 5-12: Iso-réponse de la résistance en compression à 180 jours en fonction du rapport E/L et %PV	92
Figure 5-13: Iso-réponse pour la résistance en compression à 1 an en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre (%PV).....	94
Figure 5-14: Iso-réponse pour la perméabilité aux ions chlorés à 28 jours (Coulombs)	95
Figure 5-15: Iso-réponse de la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours (Coulombs).....	96
Figure 5-16: Iso-réponse pour la perméabilité aux ions chlorés à 91 jours	98
Figure 5-17: Iso-réponse pour la perméabilité aux ions chlorés à 180 jours	99
Figure 5-18: Iso-réponse de la perméabilité à 1 an (Coulombs).....	101
Figure 5-19: Relation entre le coût unitaire (100 \$/t) et KCl à 56 jours (Coulombs).....	102
Figure 5-20: Relation entre le coût unitaire (200 \$/t) et KCl à 56 jours	103
Figure 5-21: Relation entre Fc à 28 jours & Perméabilité à 56 jours pour une catégorie de prix de (150 \$/t) en fonction de rapport E/L, %PV et liant de 375 kg/m ³	105
Figure 5-22: Relation entre Fc à 28 jours & Perméabilité à 91 jours pour une teneur en liant de 375 kg/m ³	106
Figure 5-23: Résistance en compression pour les bétons binaires.....	112
Figure 5-24: Le gain de résistance en compression pour les bétons binaires par rapport à 28 jours	112
Figure 5-25: La résistance en compression pour les bétons ternaires	114
Figure 5-26: Le gain de résistance en compression pour les bétons ternaires par rapport à 28 jours	115
Figure 5-27: Les résistances en traction pour les bétons binaires	117
Figure 5-28: Résistance en traction pour les bétons ternaires	118
Figure 5-29: Résistance en flexion pour les bétons binaires.....	120
Figure 5-30: Résistance en flexion pour les bétons ternaires.....	121
Figure 5-31: Le module d'élasticité des bétons binaires	123
Figure 5-32: Le module d'élasticité des bétons ternaires	123
Figure 5-33: La charge totale (Coulombs) passée à travers les bétons binaires.....	125
Figure 5-34: La charge totale (Coulombs) passée à travers les bétons ternaires	127
Figure 5-35: Masse écaillée après 56 cycles de gel-dégel pour les bétons binaires.....	130
Figure 5-36: Masse écaillée après 56 cycles de gel-dégel pour les bétons ternaires.....	131
Figure 5-37: Retrait au séchage des bétons binaires	132
Figure 5-38: Retrait au séchage des bétons ternaires	133
Figure 5-39: Le coût unitaire des mélanges incorporant du verre.....	134
Figure 5-40: Relation entre la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours et le coût unitaire pour des bétons formulés avec du verre.....	135

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 : Les valeurs absolues des paramètres étudiées.....	30
Tableau 3.2: Propriétés mesurées pour les mélanges de phase 2.....	31
Tableau 3.3: Les mélanges du plan factoriel.....	34
Tableau 3.4: Les différentes réponses étudiées.....	36
Tableau 3.5: Les bétons de validation pour les modèles linéaires.....	37
Tableau 3.6: Les bétons de validation pour les modèles quadratiques.....	37
Tableau 3.7: Récapitulation des essais effectués.....	38
Tableau 3.8 : Les différents niveaux de perméabilité.....	47
Tableau 3.9: L'évaluation qualitative de l'essai de l'écaillage selon la norme BNQ 2621-900.....	49
Tableau 4.1: Granulométrie des granulats fins.....	51
Tableau 4.2: La granulométrie des gros granulats.....	53
Tableau 4.3: La composition chimique des ciments et des ajouts utilisés dans ce projet.....	58
Tableau 4.4: La formulation des mélanges des points factoriels.....	59
Tableau 4.5: La formulation des mélanges des points centraux et points axiaux.....	59
Tableau 4.6: La formulation des mélanges de validation des modèles linéaires.....	60
Tableau 4.7: La formulation des mélanges de validation des modèles quadratiques.....	60
Tableau 4.8: La formulation des mélanges binaires de la Phase 2.....	61
Tableau 4.9: La formulation des mélanges ternaires de la phase 2.....	61
Tableau 5.1: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges des points factoriels.....	62
Tableau 5.2: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges des points centraux et des points axiaux.....	62
Tableau 5.3: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges de validation des modèles linéaires.....	62
Tableau 5.4: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges de validation des modèles quadratiques.....	63
Tableau 5.5: Résistance en compression pour les mélanges du plan factoriel.....	63
Tableau 5.6: La perméabilité aux ions chlorures pour les mélanges du plan factoriel.....	64
Tableau 5.7 : Les modèles linéaires de la résistance en compression.....	65
Tableau 5.8: Les modèles quadratiques de la résistance en compression.....	65
Tableau 5.9: Les modèles linéaires de la perméabilité aux ions chlorures.....	68
Tableau 5.10: Les modèles quadratiques de la perméabilité aux ions chlorures.....	68
Tableau 5.11: Les modèles linéaires du coût unitaire du béton.....	71
Tableau 5.12: Les modèles linéaires du coût unitaire du béton.....	71
Tableau 5.13: Les mélanges de validation [Zidol, 2010].....	72
Tableau 5.14: Valeurs mesurées et prédites pour les mélanges de validation des modèles de résistance en compression.....	74
Tableau 5.15: Valeurs mesurées et prédites pour les mélanges de validation des modèles de perméabilité.....	75
Tableau 5.16: La fiabilité des résultats de la résistance en compression.....	76
Tableau 5.17: La fiabilité des résultats de la perméabilité.....	76
Tableau 5.18: Les propriétés à l'état frais pour les bétons binaires.....	109
Tableau 5.19: Les propriétés à l'état frais pour les bétons ternaires.....	110
Tableau 5.20: Les résistances en compression pour les bétons binaires.....	111
Tableau 5.21: La résistance en compression pour les mélanges ternaires.....	113

Tableau 5.22: caractéristiques du réseau des bulles d'air et les facteurs de durabilité.....	128
Tableau 5.23: Résistance des bétons exposés à l'écaillage (BNQ2621-900)	129

Chapitre 1 - Introduction

Au Canada, les conditions climatiques sévères associées à des variations extrêmes de températures (de -30 C° à 35 C°) causent des dégradations accélérées des bétons, notamment ceux qu'on retrouve dans les ponts et les stationnements extérieurs. Puisque le coût des réparations de ces structures dépasse les 10 milliards de dollars en 2004, l'utilisation des matériaux durables devient une nécessité pour améliorer la durée de vie des infrastructures. L'utilisation des ajouts cimentaires est une pratique courante au Canada depuis les années 70. Les ajouts normalisés les plus utilisés sont, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau. Au Québec, le ciment portland composé incorporant de la fumée de silice (GUb-SF) est couramment utilisé dans les applications qui exigent des bétons à haute performance (BHP) et une durabilité améliorée.

L'incorporation des ajouts cimentaires dans le béton améliore sa durabilité, réduit son coût et aussi son impact environnemental [Malhotra, 2010]. Par exemple, il est reporté que les ajouts cimentaires peuvent prolonger la durée de vie d'un pont de 50 à 100 ans [Keck, 2001]. Malgré tous ces avantages, seulement 2% des ciments utilisés au Canada contiennent des ajouts cimentaires en 2002 [Bouzoubâa et al., 2005]. Ceci est peut-être dû à une mauvaise connaissance des effets de ces ajouts sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Aussi, l'utilisation des ajouts cimentaires nécessite une bonne compréhension des interactions avec le ciment portland et les adjuvants, chose qu'on maîtrise plus ou moins bien [Bouzoubâa et al., 2005].

Les études menées à l'Université de Sherbrooke montrent que la poudre de verre (PV) est un matériau pouzzolanique qui peut être utilisé comme un ajout cimentaire alternatif dans le béton [Aladdine, 2009 et Zidol, 2009]. À travers ces études, il a été montré que l'incorporation de 20% de PV dans le béton lui procure des bonnes caractéristiques mécaniques et améliore sa durabilité [Zidol, 2009]. Aussi, ces études ont montré que l'incorporation de 20% de PV réduit la perméabilité aux ions chlore, améliore la résistance aux cycles de gel-dégel et réduit l'expansion due à la réaction alcalis silice. Ces bétons sont 3 fois plus durables que ceux incorporant du ciment portland seulement [Zidol, 2009]. Ce taux de remplacement du ciment par la poudre de verre (20% PV) a été déterminé pour des paramètres de formulation donnés en adoptant une approche d'optimisation conventionnelle plutôt qu'une approche mathématique. Des recherches supplémentaires sont alors nécessaires pour maximiser le potentiel

d'utilisation de la PV dans le béton. La première partie de cette étude est consacrée à la détermination de taux d'incorporation optimal de la PV en fonction des paramètres de formulation tels que le rapport E/L, le dosage en liant (kg/m^3) et l'interaction entre les différents paramètres de formulation. Il est difficile de déterminer l'interaction entre ces paramètres de formulation par les méthodes conventionnelles. L'utilisation des plans d'expériences représente une approche pertinente pour la compréhension des effets de différents paramètres de formulation sur les différentes caractéristiques du béton. Un plan factoriel composite à deux niveaux a été réalisé pour modéliser l'effet des trois différents paramètres sur les différentes propriétés du béton et son coût unitaire. Les paramètres modélisés sont le rapport E/L, le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre (%PV) et le dosage en liant (kg/m^3). Les réponses étudiées sont les résistances en compression à différents âges, la perméabilité aux ions chlore à différents âges ainsi que le coût unitaire du béton pour différents prix unitaires de la poudre de verre. Des mélanges de validation situés à l'intérieur du domaine expérimental sont préparés pour l'établissement de la fiabilité de ces modèles. Des courbes iso-réponses sont établies pour différentes propriétés du béton. Elles sont utilisées pour prédire l'évolution des propriétés du béton en fonction de différentes variables de formulation. L'approche du plan factoriel est exploitée pour maximiser le potentiel d'utilisation de la poudre de verre dans le béton en fonction d'autres paramètres de formulation.

La deuxième partie de cette étude est consacrée à la détermination des propriétés mécaniques et de la durabilité des bétons optimisés dans la première partie et des bétons ternaires de référence. Ils sont proportionnés avec un rapport E/L et un dosage en liant (kg/m^3) constants. Trois bétons binaires formulés avec différents pourcentages de la poudre de verre (de 15% à 25%) et un béton témoin sont confectionnés pour mieux comprendre le comportement des bétons incorporant de la PV face aux agents potentiellement agressifs et l'évolution de leurs propriétés mécaniques en fonction du temps. Il est aussi nécessaire de comprendre le comportement de la poudre de verre dans les bétons ternaires au niveau de la performance mécanique et de la durabilité dans les milieux agressifs. Un béton ternaire formulé avec 20% de la PV et 5% de la fumée de silice est confectionné avec deux autres bétons ternaires proportionnés avec deux différents types des ciments ternaires commerciaux disponibles au Québec.

Chapitre 2 – La recherche bibliographique

Cette partie présente les recherches qui ont été effectuées sur des bétons incorporants différents types d'ajouts cimentaires, notamment la poudre de verre comme un remplacement partiel du ciment portland.

2.1 Propriétés à l'état frais

Dans les bétons conventionnels ayant un rapport E/L de 0,55, le remplacement partiel du ciment portland par 20% de la poudre de verre résulte en une diminution du dosage en agent entraîneur d'air (AEA) par rapport au béton témoin [Zidol, 2009]. [Zidol, 2009] a étudié le remplacement de 20% et 30% du ciment portland par deux types de la poudre de verre (6 x 25) et (9 x 25) ayant respectivement des finesses de 374 et 436 m²/kg et il a trouvé que les mélanges binaires avec 20% et 30% de la poudre de verre ont respectivement des dosages en AEA de 20ml/100 kg et 25 ml/100 kg inférieur à celui du témoin pour obtenir une teneur en air entre 5% et 8%. Une étude menée par [Aladdine, 2009] sur 3 bétons ternaires proportionnés avec 20% de la poudre de verre et incorporant 5% de la fumée de silice, 8% de métakaolin et 12% de laitier montre que les mélanges ternaires requièrent un dosage en AEA plus élevé que celui de témoin pour un même rapport E/L. Ce résultat est attribué à la finesse élevée des ajouts utilisés. En effet, l'incorporation de la poudre de verre dans les mélanges du béton donne un affaissement d'au moins 8% supérieur à celui de témoin, ce qui signifie une amélioration de l'ouvrabilité [Zidol, 2009].

Les bétons ternaires à haute performance avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant de la poudre de verre requièrent un dosage en AEA plus élevé que celui du témoin et du binaire avec 20% de la poudre de verre [Aladdine, 2009]. Le béton binaire formulé avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% de poudre de verre a le même dosage en superplastifiant que le béton témoin pour avoir un affaissement donné. Par contre, les mélanges ternaires indiqués ci-dessus nécessitent un dosage en superplastifiant plus élevé que celui du témoin. Ceci est attribué à l'augmentation de la demande en eau du métakaolin et la surface spécifique élevée de la fumée de silice, ainsi que celle du laitier [Aladdine, 2009]. Des mélanges binaires incorporant 20% et 30% de la poudre de verre ont un dosage en superplastifiant de 14% inférieur à celui de témoin [Zidol, 2009].

Les recherches menées à l'Université de Sherbrooke montrent que la finesse de la poudre de verre n'a pas d'effets significatifs sur la demande en AEA et en superplastifiant pour avoir une teneur en air donnée et un affaissement donné [Zidol, 2009; Aladdine, 2009].

Une étude menée par [Taha et al., 2008] sur des mélanges avec un rapport E/L de 0,38 et un dosage en liant de 440 kg/m³ montre que l'incorporation de 20% de poudre de verre améliore les propriétés à l'état plastique par rapport au béton témoin. Cette incorporation contribue à diminuer la masse volumique du béton par rapport au béton témoin.

2.2 Propriétés à l'état durci

2.2.1 Résistance en compression

Pour des bétons conventionnels proportionnés avec un rapport E/L de 0,50 et incorporant 25% de laitier, la résistance en compression à 28 jours est semblable à celle du témoin. Par contre, celle d'un mélange contenant 25 % de cendres volantes est inférieure à celle du béton témoin [Ramezani pour et al., 1995]. Des mélanges ternaires formulés avec des proportions différentes de laitier (de 50% à 80%) et incorporant 5% de fumée de silice sont préparés pour comparer leur résistance en compression avec un mélange incorporant 100% du ciment portland. Tous les mélanges ont un rapport E/L de 0,35 et un dosage en liant de 450 kg/m³. La résistance en compression du mélange avec 50% de laitier dépasse de 10 MPa celle du béton témoin avec 100% du ciment portland, tandis que celle du béton contenant 80% de laitier est de 3 MPa de plus que celle du témoin. En ajoutant du laitier, il y a une formation d'un gel de C-S-H additionnel et une consommation de la chaux ce qui amène une densification de la microstructure et une diminution de la porosité capillaire. Par conséquent, les bétons incorporant des ajouts minéraux ont une résistance plus élevée que celle du témoin. [Saric-Coric et al., 2003].

[Megat Johari et al., 2011] ont préparé des bétons à haute performance avec un rapport E/L de 0,28. Des mélanges incorporant 10%, 20% et 30% de cendres volantes et d'autres contenants 20%, 40% et 60% de laitier sont préparés et les résistances en compression sont comparées avec celle du béton témoin. À l'âge de 28 jours, les bétons incorporant 10%, 20% et 30% de cendres volantes développent une résistance en compression égale de 95% à 99% de celle du béton témoin. À l'âge de 1 an, ces bétons développent des résistances de 104% à 112% de celle du béton témoin. Donc, un remplacement du

ciment portland par 30% de cendres volantes est optimal pour développer une résistance élevée à long terme. Pour les mélanges formulés avec le laitier, la résistance maximale à long terme est obtenue avec le béton contenant 20% de laitier (105% de témoin).

Les résistances en compression pour des bétons avec de la poudre de verre sont présentées dans la figure 2.1 [Shao et al., 2000]. Trois mélanges du béton ayant un rapport E/L de 0,75 et incorporant 30% de la poudre de verre ayant des tailles de particules de 38 μm à 150 μm ont été préparés. Les résultats montrent que le béton témoin développe la plus grande résistance en compression à tous les âges. Cependant, à l'âge de 90 jours, le mélange incorporant 30% de poudre de verre ayant une dimension des particules de 38 μm donne une résistance plus élevée que celle du témoin. Donc, plus la taille des particules de la poudre de verre diminue, plus la résistance en compression augmente. [Shao et al., 2000].

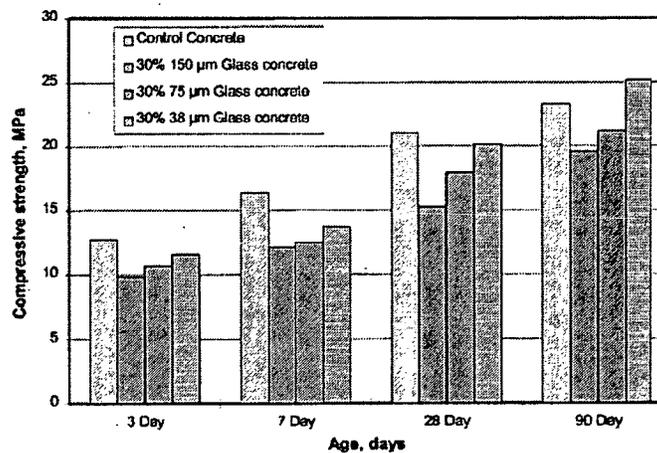


Figure 2-1: Résistances en compression des bétons incorporant 30% de poudre de verre [Shao et al., 2000]

Les résistances en compression des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 sont présentées dans la figure 2.2 [Schwarz et al., 2008]. Un béton proportionné avec 10% de poudre de verre développe une résistance en compression plus élevée que celle du béton avec 10% de cendres volantes à 28 jours. Ceci peut être expliqué par le rôle important de la poudre de verre à activer l'hydratation du ciment à 28 jours grâce à sa réactivité pouzzolanique. Par contre à l'âge de 90 jours, la résistance du béton contenant 10% de cendres volantes est plus élevée que celle de béton avec 10% de poudre de verre. Ceci peut être lié à l'efficacité de la réaction pouzzolanique de cendres volantes qui devient plus importante que la réaction

secondaire de la poudre de verre à 90 jours. Par contre, les deux mélanges donnent des résistances en compression plus faibles que celles du témoin à 28 jours [Schwarz et al., 2008].

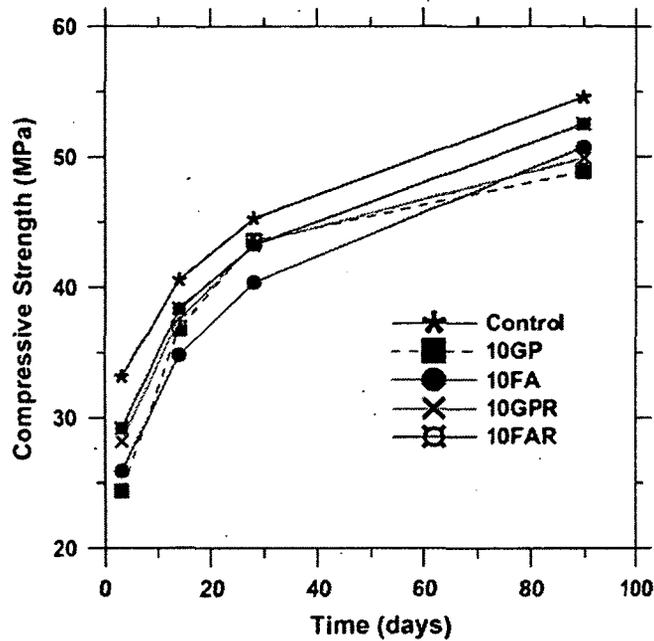


Figure 2-2 : Résistance en compression [Schwarz et al., 2008]

Un béton formulé avec 20% de poudre de verre donne une résistance en compression plus élevée que celle d'un mélange proportionné avec 20% de cendres volantes à l'âge de 14 jours. Ceci est dû à l'amélioration de l'hydratation du ciment portland en présence de la poudre de verre. Cependant, à plus long terme, les bétons formulés avec 20% de cendres volantes développent des résistances légèrement supérieures à celles des bétons avec 20% de poudre de verre. Donc, le comportement de cendres volantes et de la poudre de verre est presque identique aux âges plus avancés [Neithalath, 2011].

Un remplacement du ciment portland par 20% de la poudre de verre est optimal du point de vue de résistance en compression grâce à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre. Ce taux de remplacement sert à remplir les vides entre les particules de la pâte du ciment hydratée ce qui donne une microstructure plus dense [Patagundi et al., 2008].

La figure 2-3 présente des mélanges proportionnés avec 10%, 20% et 30% de la poudre de verre ayant une finesse de 800 m²/kg ainsi qu'un béton formulé avec 100% du ciment portland. À jeune âge, les bétons contenant de la poudre de verre développent une résistance en compression plus faible que celle obtenue avec le béton témoin. Ce phénomène peut être lié à la faible teneur en ciment dans les bétons

avec de la poudre de verre. Cependant, à l'âge de 56 jours, la résistance en compression des bétons incorporant de la poudre de verre est presque similaire avec celle du témoin. Alors, ces bétons développent leurs résistances en compression aux âges plus avancés à condition qu'un mûrissement humide soit appliqué [Shayan et al., 2004].

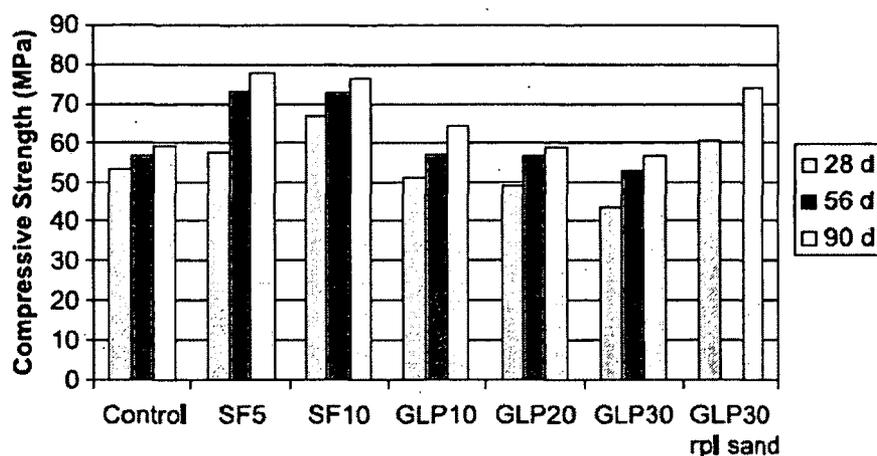


Figure 2-3: La résistance en compression des bétons incorporant de la poudre de verre en comparaison avec celle du béton témoin [Shayan et al., 2004]

[Shayan et al., 2006] ont montré que le gain de résistance en compression entre 28 et 90 jours est plus important dans le cas d'un mélange formulé avec 30% de poudre de verre que le béton témoin. La réactivité pouzzolanique de la poudre de verre pendant cette période a l'effet le plus significatif sur le développement de la résistance en compression. [Taha et al., 2008] ont observé aussi que l'incorporation de 20% de poudre de verre cause une réduction de la résistance en compression de 16% par rapport au témoin à 28 jours. Cette réduction est causée par la différence de la nature des produits d'hydratation formés et celle de gel de C-S-H.

Une étude réalisée à l'Université de Sherbrooke sur un béton binaire formulé avec 20% de la poudre de verre et des bétons ternaires proportionnés avec 20% de poudre de verre ayant une finesse de 555 m²/kg et incorporant 5% de fumée de silice, 8% de métakaolin et 12% de laitier montre que l'incorporation de la poudre de verre finement broyé a des effets significatifs sur l'amélioration de résistance en compression dans le temps par rapport au témoin [Aladdine, 2009]. Dans le cas des bétons conventionnels proportionnés avec un rapport E/L de 0,55, le béton contenant 20% de verre développe une résistance légèrement inférieure à celle de témoin à l'âge de 7 jours, mais elle dépasse celle du béton témoin après 28 jours. Cependant, la résistance en compression du béton ternaire formulé avec 20% de

la poudre de verre et 12% de laitier dépasse légèrement celle du témoin à 28 jours. Par contre, les résistances en compression des bétons ternaires formulés avec 20% de la poudre de verre et incorporant 5% de fumée de silice et 8% de métakaolin sont de 5 MPa supérieures que celle du béton témoin à 28 jours. Le gain de résistance en compression à jeune âge pour les bétons ternaires formulés avec 5% de fumée de silice et 8% de métakaolin est dû surtout à la rapidité avec laquelle ces ajouts réagissent et non pas au verre broyé [Aladdine, 2009].

La réactivité pouzzolanique de la poudre de verre toute seule dans les mélanges binaires avec un rapport E/L de 0,55 ou 0,40 augmente d'une façon continue dans le temps. Mais, elle est plus accentuée et plus développée dans un environnement humide à fort dosage en eau (E/L de 0,55) [Aladdine, 2009].

La figure 2-4 présente les valeurs de la résistance en compression réalisée par [Zidol, 2009] sur des bétons binaires incorporant de la poudre de verre ayant deux finesses différentes de 374 m²/kg (6 x 25) et 436 m²/kg (9 x 25). Les résultats montrent que la résistance en compression des bétons binaires formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre est inférieure à celle du témoin entre 1 et 28 jours. À l'âge de 28 jours, les résistances en compression pour les mélanges contenant 20% et 30% de poudre de verre représentent respectivement 85% et 87% de celle du témoin. À 91 jours, les mélanges contenant de la poudre de verre développent des résistances variant de 94% à 103% de celle de témoin.

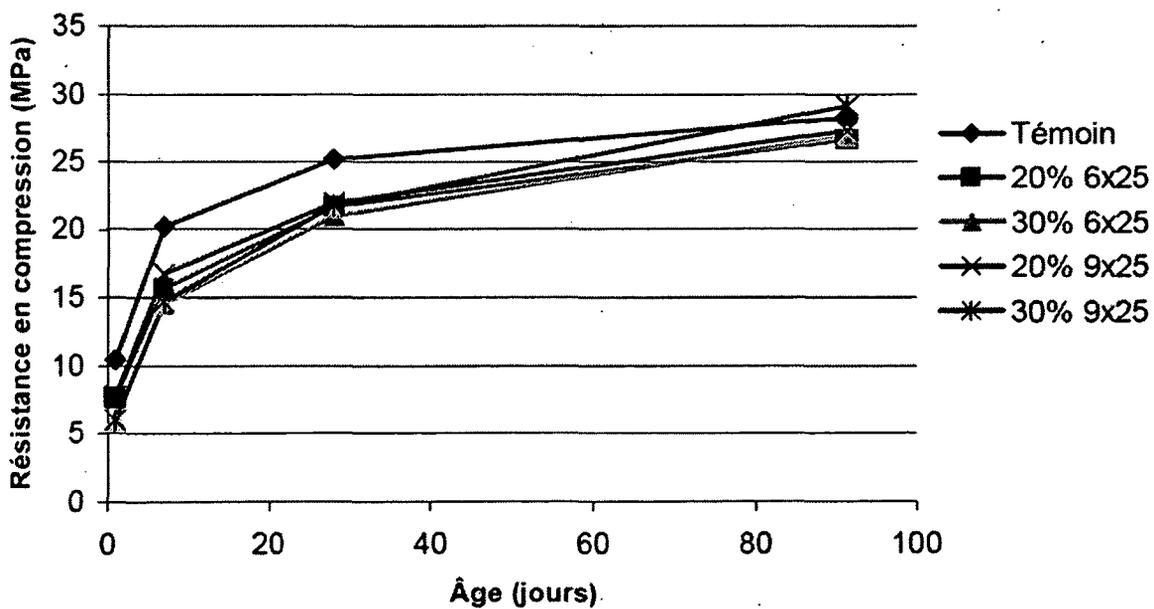


Figure 2-4: Résistance en compression pour les bétons avec E/L de 0,55[Zidol, 2009]

La figure 2-5 présente les valeurs de la résistance en compression pour des bétons à haute performance (BHP) proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de poudre de verre (PV). Les résistances sont inférieures d'au moins 7 MPa à celle de témoin quelque soit l'âge du béton. Dans le cas des mélanges contenant 30% de la PV, le taux de développement de la résistance en compression est plus élevé que ceux des mélanges contenant 20% de poudre de verre et le témoin. Ceci illustre un développement de résistance relativement proportionnel au taux d'incorporation de la poudre de verre [Zidol, 2009].

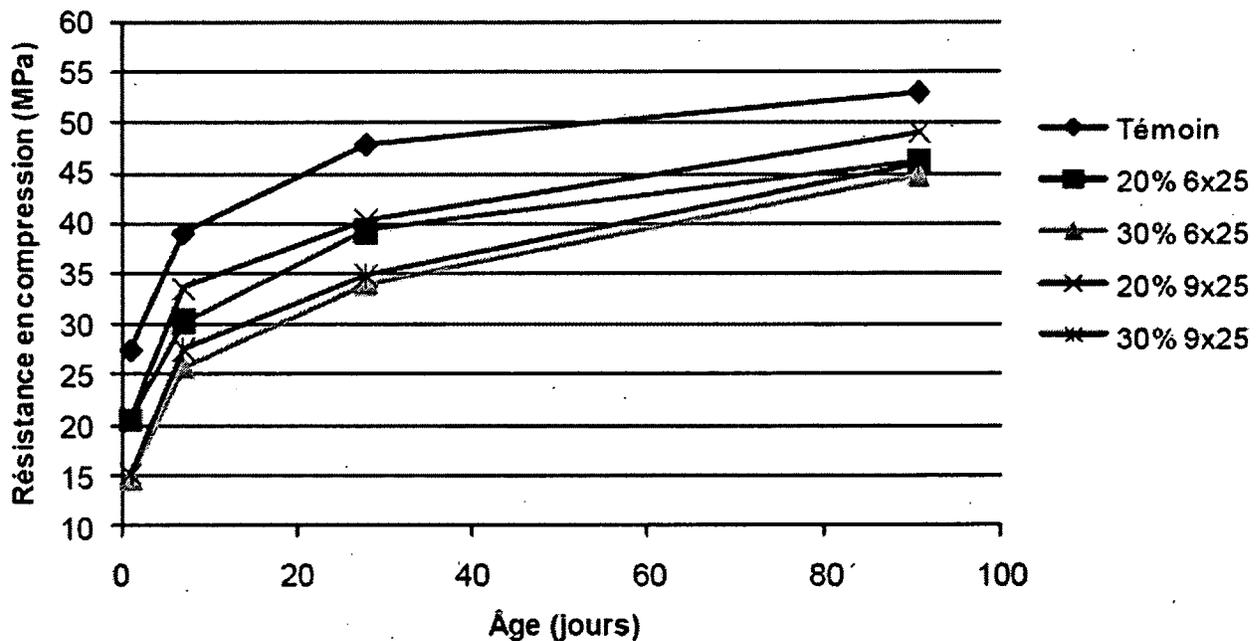


Figure 2-5 : Résistance en compression pour les BHP avec un rapport E/L de 0,40 [Zidol, 2009]

L'effet de la finesse de la poudre de verre étudiée est assez négligeable autant dans les mélanges formulés avec un rapport E/L de 0,55 que avec un rapport E/L de 0,40. Par contre, l'effet du taux d'incorporation de la poudre de verre est remarquable dans les mélanges proportionnés avec un rapport E/L de 0,40, mais non significatif dans le cas des mélanges avec un rapport E/L de 0,55 sur le développement de la résistance en compression [Zidol, 2009].

2.2.2 Résistance en traction

[Nazari et al., 2011] ont étudié l'effet d'incorporation des laitiers de haut fourneau sur le développement de la résistance en traction par rapport au béton témoin pour des mélanges formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant des proportions différentes de laitier variant de 15% à 60%. Ils ont observés qu'un taux de remplacement du ciment par 45% de laitier engendre une augmentation importante de la résistance en traction à 28 et à 90 jours. Cependant, l'incorporation de plus de 45% de laitier réduit la résistance en traction à cause du manque de la quantité de chaux nécessaire pour produire des cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le gel de C-S-H. La figure 2-6 montre que le béton incorporant 20% de la poudre de verre donne une résistance en traction semblable à celle du témoin à l'âge de 28 jours. Donc, ce taux de remplacement du ciment n'a pas d'effet négatif sur la résistance en traction [Taha et al., 2008].

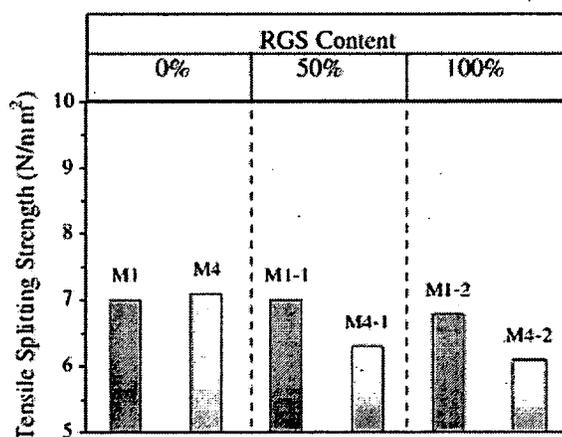


Figure 2-6 : Résistance en traction à 28 jours [Taha et al., 2008]

Pour les bétons conventionnels proportionnés avec un rapport E/L de 0,55, le béton incorporant 20% de verre et les bétons ternaires formulés avec 20% de verre et incorporant 5% de fumée de silice, 8% de métakaolin et 12% de laitier développent des résistances en traction plus élevées que celle du témoin à 28 et à 91 jours. Pour les bétons à haute performance formulés avec E/L de 0,40, c'est uniquement le ternaire avec le métakaolin et le ternaire avec le laitier qui donnent des résistances en traction supérieure à celle de témoin à 28 et à 91 jours. Alors, entre 28 et 91 jours, le béton incorporant 20% de verre et les bétons ternaires proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 ont des gains de résistance en traction plus importants que ceux formulés avec un rapport E/L de 0,40 [Aladdine, 2009].

[Zidol, 2009] a observé que la résistance en traction des bétons conventionnels proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre est presque similaire mais légèrement inférieures à celle de témoin à 28 jours. À l'âge de 91 jours, la résistance en traction des mélanges contenant 30% de la poudre de verre dépasse celles des mélanges avec 20% de la poudre de verre d'environ 11% et 16% pour les poudres ayant des finesses de 374 m²/kg (6 x 25) et 436 m²/kg (9 x 25) respectivement. Elle dépasse aussi celle du témoin de 27%. Ceci démontre une meilleure amélioration de la résistance en traction avec un taux de remplacement de 30% par rapport à 20%. La figure 2-7 présente les valeurs de la résistance en traction pour des bétons à haute performance proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de verre [Zidol, 2009]. La résistance en traction à 28 et à 91 jours pour des mélanges contenant de la poudre de verre est similaire à celle du témoin à l'exception du mélange formulé avec 30% de poudre de verre (6*25) qui donne une résistance légèrement inférieure à celle du témoin à 28 jours [Zidol, 2009].

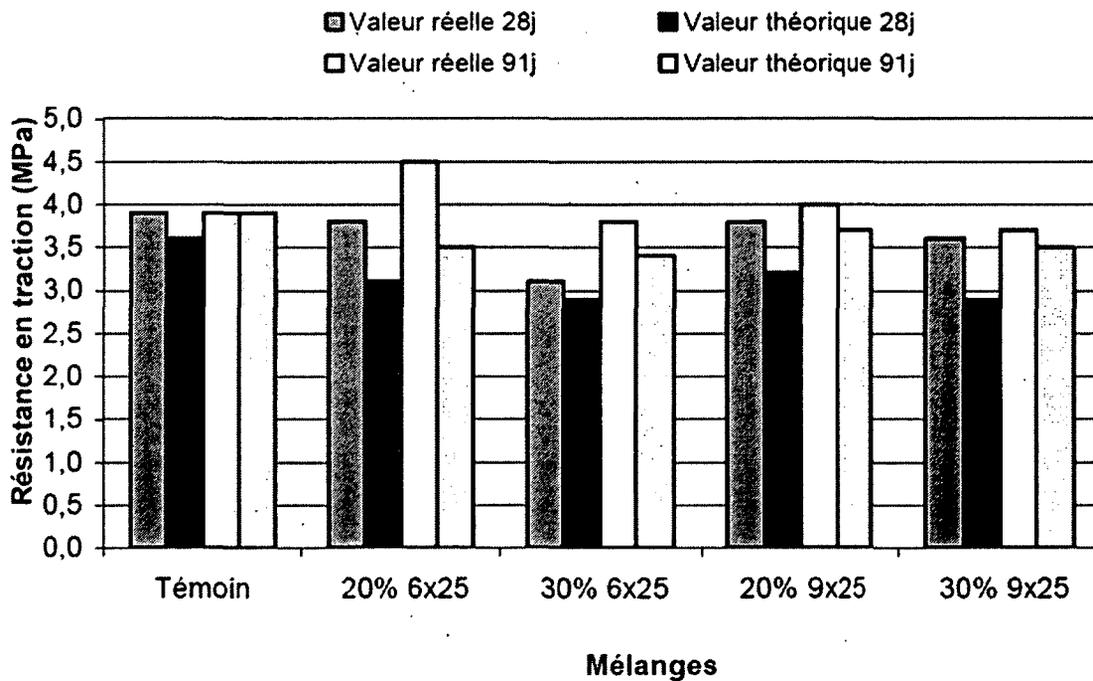


Figure 2-7 : Résistance en traction pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 [Zidol, 2009]

2.2.3 Résistance en flexion

Deux bétons ternaires à haute performance proportionnés avec un rapport E/L de 0,35 et 10% de fumée de silice et incorporant 15% et 25% de cendres volantes (Classe F) sont comparés avec un béton témoin ayant le même rapport E/L. La résistance en flexion pour les bétons ternaires dépasse celle du béton témoin à 28 jours. Ceci démontre l'effet significatif d'incorporer 10% de fumée de silice sur l'augmentation de la résistance en flexion à cet âge [Khatri, 1995].

Un mélange binaire proportionné avec un rapport E/L de 0,38 et incorporant 20% de la poudre de verre donne une résistance en flexion similaire à celle du béton témoin à l'âge de 28 jours. Donc, ce taux de remplacement du ciment par la poudre de verre n'a pas un effet négatif sur le développement de résistance en flexion [Taha et al., 2008].

Les valeurs de résistance en flexion à 130 jours sont présentées dans la figure 2-8 [Shayan et al., 2006]. Des mélanges incorporant 20% et 30% de poudre de verre formulés avec un rapport E/L de 0,49 donnent une résistance en flexion inférieure à celle du béton témoin à l'âge de 130 jours. Alors, le taux de remplacement de 30% semble avoir un effet significatif sur la réduction de la résistance en flexion par rapport au témoin à l'âge de 130 jours [Shayan et al., 2006].

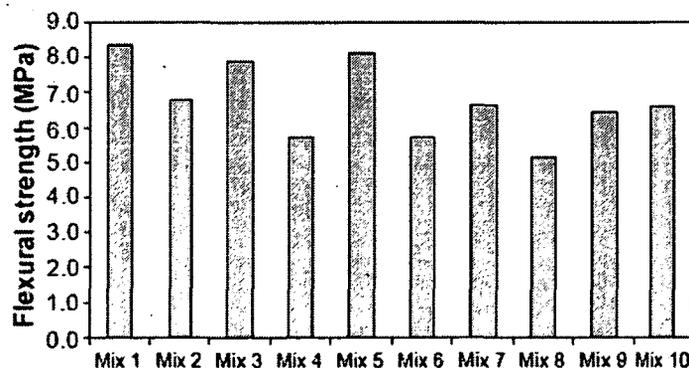


Figure 2-8 : Résistance en flexion à 130 jours [Shayan et al., 2006]

Cette différence entre le comportement de la poudre de verre étudiée par [Taha et al., 2008] et [Shayan et al., 2006] semble être liée à la différence de finesse des poudres de verre utilisées. La finesse de la poudre utilisée par [Shayan et al., 2006] est de $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ avec une taille moyenne des particules

inférieure à 15 μm . Par contre, la poudre de verre utilisée par [Taha et al., 2008] a une taille moyenne des particules de 45 μm .

Pour un rapport E/L de 0,55, les résistances en flexion pour le béton incorporant 20% de verre et pour les bétons ternaires formulés avec 20% de verre et contenant 5% de fumée de silice, 8% de métakaolin et 12 % de laitier sont supérieures à celles de témoin à 28 et à 91 jours. Par contre, pour les bétons à haute performance proportionnés avec un rapport E/L de 0,40, seul le béton ternaire contenant 12% de laitier affiche une résistance en flexion légèrement supérieure à celle du témoin à 28 jours. Pour les bétons ternaires proportionnés avec 20% de la poudre de verre et incorporant 5% de fumée de silice et 12% de laitier; des résistances en flexion supérieures à celle du béton témoin à 91 jours sont obtenues. Cependant, la résistance en flexion de béton incorporant 20% de la poudre de verre est égale à celle du béton témoin à 91 jours [Aladdine, 2009]. L'effet de la poudre de verre broyée sur la résistance en flexion est moins marqué en présence de la fumée de silice et du métakaolin dans le cas d'un rapport E/L relativement élevé (E/L = 0,55) [Aladdine, 2009].

Les résistances en flexion des bétons conventionnels formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre sont similaires à celle du témoin à 28 jours [Zidol, 2009]. La figure 2-9 présente les valeurs de la résistance en flexion pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre. Les résistances en flexion pour les bétons contenant de la poudre de verre sont inférieures d'au moins 0,60 MPa à celle du témoin à 28 jours [Zidol, 2009].

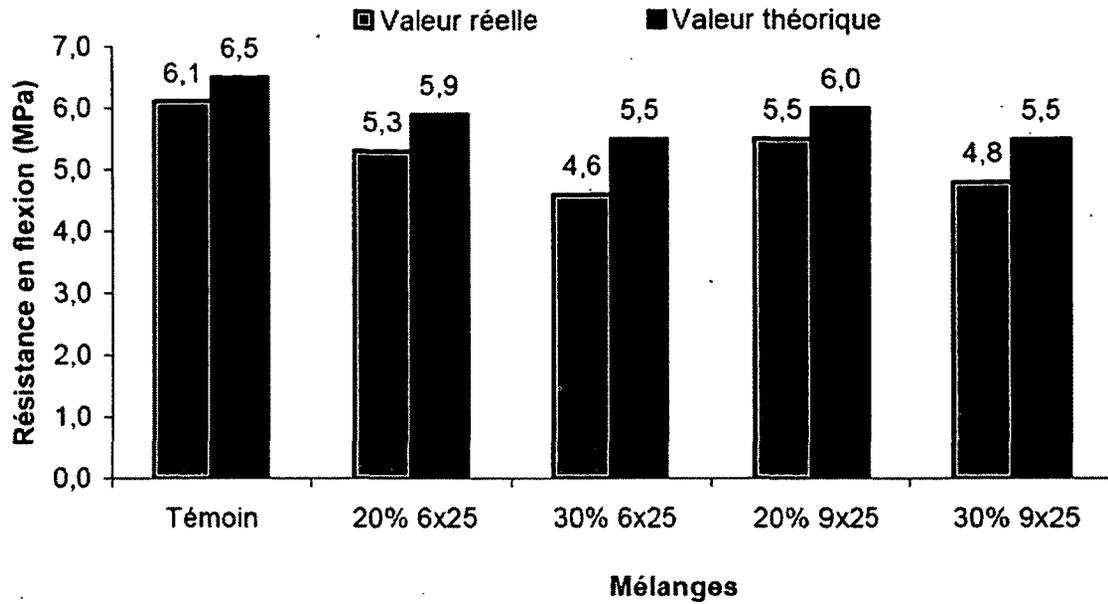


Figure 2-9 : Résistance en flexion pour les bétons à haute performance [Zidol, 2009].

2.2.4 Le module d'élasticité

Dans le cas des bétons à haute performance proportionnés avec un rapport E/L de 0,28, l'incorporation de 10%, 20% et 30% de cendres volantes n'a pas un effet significatif sur la réduction du module d'élasticité par rapport au béton témoin à l'âge de 28 jours [Megat Johari et al., 2011]. La figure 2-10 présente les valeurs du module d'élasticité pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,49 et contenant de la poudre de verre [Shayan et Al, 2006]. Il est observé que l'incorporation de la poudre de verre diminue le module d'élasticité par rapport au béton témoin [Shayan et Al, 2006].

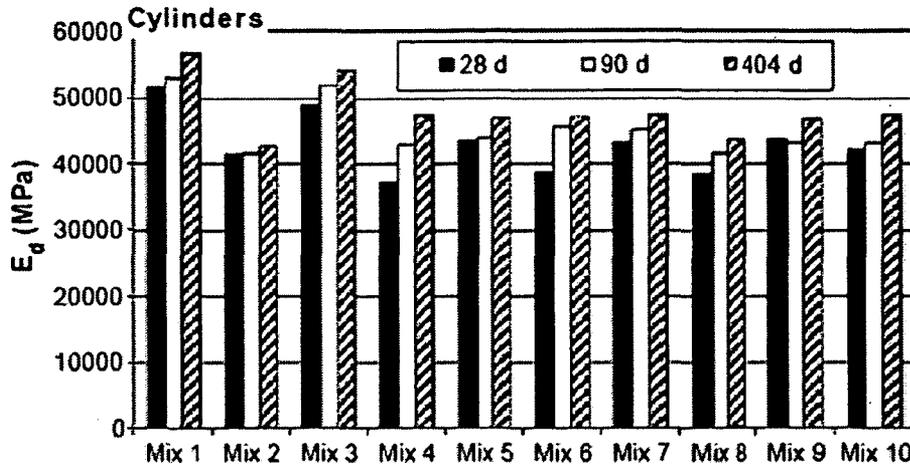


Figure 2-10: Module d'élasticité pour des bétons conventionnels [Shayan et al., 2006].

Le béton incorporant 20% de verre et le béton ternaire contenant 5% de la fumée de silice confectionnés avec des rapports E/L de 0,40 et de 0,55 développent des valeurs de module d'élasticité égales ou légèrement supérieures à celle du témoin aux âges de 28 et 91 jours. Par contre, les bétons ternaires avec 12% de laitier et 8% du métakaolin confectionnés avec un rapport E/L de 0,40 ont des valeurs significativement supérieures à celle du témoin à l'âge de 91 jours. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que l'ajout du métakaolin ou des laitiers à la poudre de verre finement broyée améliorent le module dans le cas d'un faible dosage en eau (E/L= 0,40) [Aladdine, 2009].

[Zidol, 2009] a observé que les modules d'élasticité des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre sont similaires à celui du témoin aux âges de 28 et 91 jours sauf celui incorporant 30% de la poudre (9 x25) qui est de 7% supérieur à celui du témoin à 91 jours. Par contre, pour les bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40; les valeurs du module sont égales de 90% de celle du témoin à 28 et à 91 jours.

2.2.5 La perméabilité aux ions chlore

La procédure ASTM C1202 est une des procédures d'essai la plus utilisée en Amérique du Nord pour estimer la capacité du béton à résister à la pénétration des ions chlores. Cette procédure relativement simple et rapide ne donne qu'une estimation de la résistance à la pénétration des ions chlore en utilisant une mesure indirecte basée sur la conductivité du béton. La charge totale est particulièrement sensible aux faibles valeurs de rapport E/L. Dans le cas d'un rapport E/L inférieur à 0,40, la charge totale devient faible ce qui donne une meilleure protection pour le béton contre la corrosion des barres d'armatures. [Whiting, 1988].

Pour un niveau de résistance en compression inférieur à 50 MPa, la charge totale est très variable en fonction de rapport E/L et de la teneur en ajouts cimentaires. Un taux de remplacement de 10% du ciment portland par la fumée de silice a des effets très significatifs sur la réduction de la charge totale après 6 heures [Perraton et al., 1988]. Pour un niveau de résistance en compression supérieur à 50 MPa, la charge totale est beaucoup moins variable et elle est généralement inférieure à 1000 coulombs, ce qui correspond à une perméabilité très faible. [Armaghani et al., 1991].

La figure 2-11 montre les résultats des différents bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant différents pourcentages de poudre de verre et de cendres volantes [Jain et al., 2010]. Ils ont observé que le béton formulé avec 20% de la poudre de verre a une perméabilité plus faible que celle du béton incorporant 20% de cendres volantes à l'âge de 56 jours. Cette tendance est expliquée par la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre qui provoque une densification importante de la microstructure du béton. À l'âge de 91 jours, les bétons formulés soit avec 20% de poudre de verre ou 20% de cendres volantes développent des valeurs de perméabilité aux ions chlores similaires. Cette étude montre aussi l'effet bénéfique du remplacement partiel du ciment portland soit par 20% de la poudre de verre ou par 20% des cendres volantes sur la réduction de la perméabilité du béton [Jain et al., 2010].

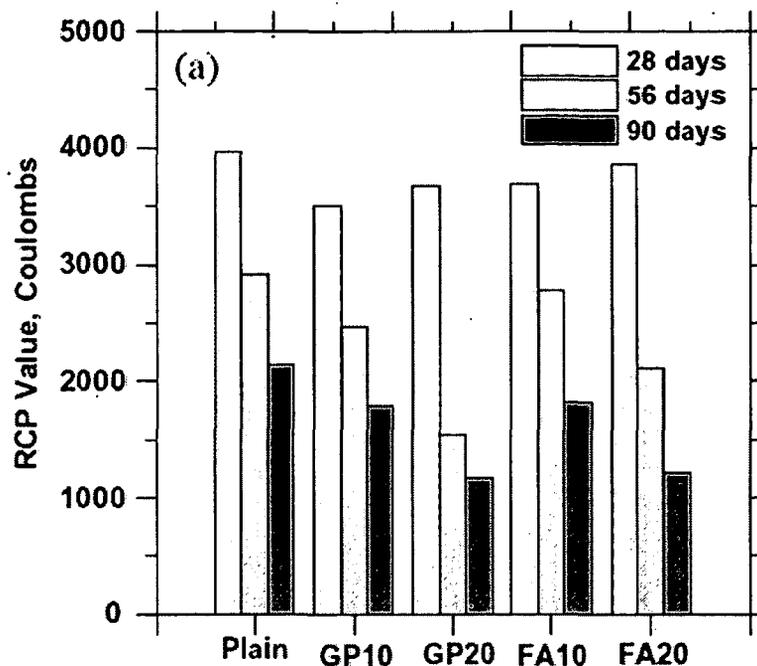


Figure 2-11: Les charges totales passées en Coulomb [Jain et al., 2010]

L'incorporation de la poudre de verre dans les bétons proportionnés avec des rapports E/L de 0,55 et 0,40 diminue la perméabilité aux ions chlorés par rapport à celle du béton témoin. La perméabilité du béton incorporant 20% de la PV est très influencée par le rapport E/L. Cependant, l'incorporation de la fumée de silice, du métakaolin ou du laitier en combinaison avec de la poudre de verre apportent des améliorations de la résistance contre la pénétration des ions chlorés à moyen et à long terme [Aladdine, 2009]. La densification apportée par ces ajouts combinée avec la poudre de verre peut être la cause de cette imperméabilisation. À long terme, l'incorporation de 20% de la poudre de verre dans le béton rend la perméabilité faible selon la classification donnée par la norme ASTM C1202, quelque soit le rapport E/L étudié (E/L de 0,40 ou de 0,55). [Aladdine, 2009].

La figure 2-12 illustre les résultats des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre [Zidol, 2009]. Les bétons incorporant 20% et 30% de la poudre de verre de type (9 x 25) affichent des valeurs de perméabilité aux ions chlorés de l'ordre de 70% et 50% respectivement de celle du béton témoin à 28 jours. Cependant, ils affichent des perméabilités de l'ordre de 27% et 20% respectivement par rapport à celle du témoin à 91 jours [Zidol, 2009]. La figure 2-13 illustre les résultats des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de poudre de verre [Zidol, 2009]. La pénétrabilité aux ions chlorés des bétons incorporant 20% et 30% de

la poudre de verre de type (9 x25) est de l'ordre de 90% à 70% de celle du béton témoin à 28 jours. En effet, ils donnent des perméabilités de l'ordre de 47% et 30% de celle du béton témoin à l'âge de 91 jours ce qui montre une réduction significative de la perméabilité en présence de la poudre de verre [Zidol, 2009]. La perméabilité aux ions chlores mesurée à 91 jours pour les mélanges formulés avec un rapport E/L de 0,55 est identique à celle obtenue sur les bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 au même âge [Zidol, 2009]. Ces observations semblent confirmer que la poudre de verre développe un effet filler à jeune âge et un effet pouzzolanique à long terme qui est plus prépondérant. La finesse de la poudre de verre n'a pas un effet significatif sur la réduction de la perméabilité aux ions chlores. [Zidol, 2009].

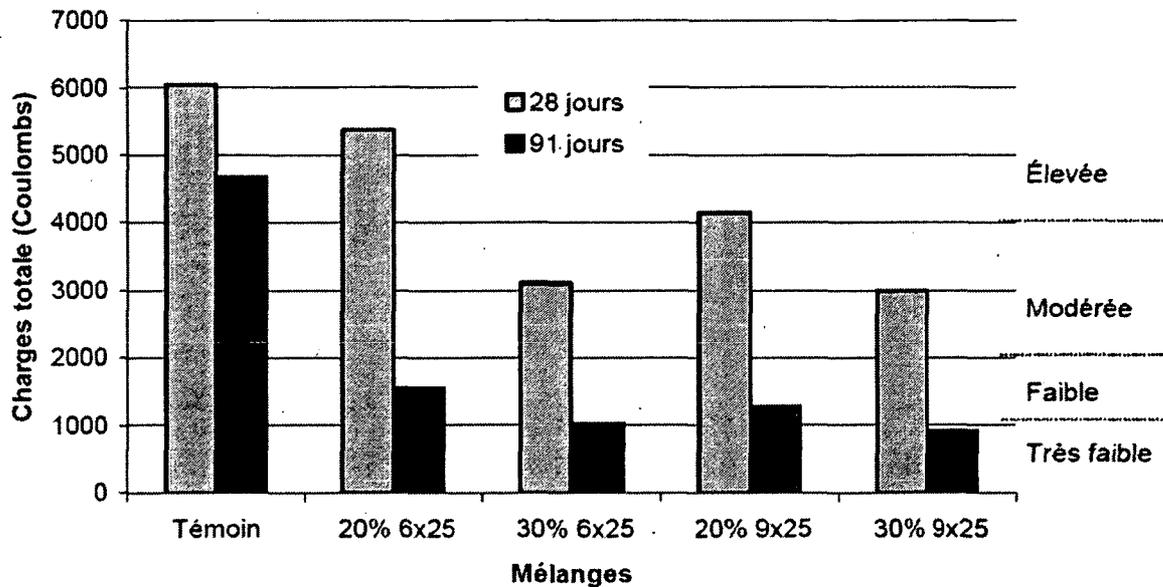


Figure 2-12: La perméabilité aux ions chlores pour les bétons conventionnels (E/L = 0,55) [Zidol, 2009].

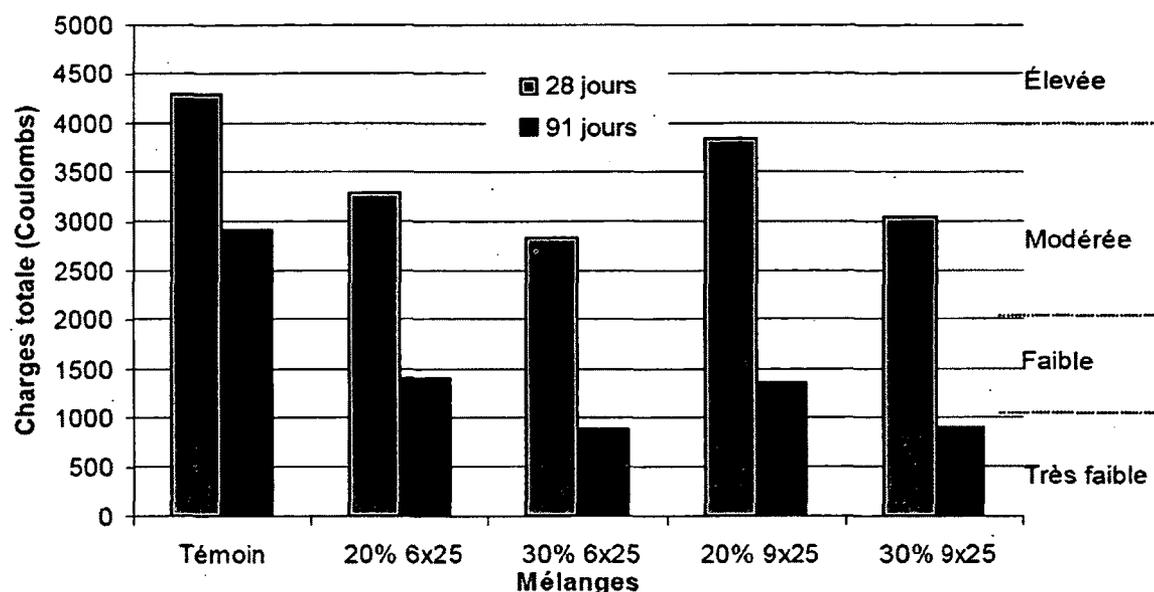


Figure 2-13: La perméabilité aux ions chlores pour les BHP ($E/L=0,40$) [Zidol, 2009].

La réduction de la perméabilité aux ions chlores des mélanges incorporant de la poudre de verre est causée par la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre qui consomme la portlandite pour produire plus de gel de 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 perméabilité [Zidol, 2009, Patagundi et al., 2008].

2.2.6 Résistance aux cycles de gel-dégel

Les conditions climatiques sévères en Amérique du Nord causent des dégradations importantes dans les bétons des infrastructures dues aux actions néfastes des cycles de gel-dégel ainsi qu'à l'utilisation du sel de déglaceage. Il est alors très important que le béton soit résistant contre ces effets néfastes pour améliorer sa durée de vie [Aitcin, 2001]. Donc, l'incorporation des bulles d'air entrainées dans le béton est primordiale pour le rendre plus durable. Les normes CAN/CSA-A23.1 recommandent que la teneur en air du béton au point de livraison au chantier doit se situer entre 5% et 8% pour les bétons de la catégorie 1 et ayant une dimension maximale de gros granulats de 20 mm [Aitcin, 2001].

Les cycles de gel-dégel causent deux types de détérioration du béton : la fissuration interne et l'écaillage des surfaces. La dégradation se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration du béton non seulement en surface, mais aussi à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel. Par contre, l'écaillage de surface est un mode de dégradation qui touche principalement la surface du béton en contact avec le milieu externe. Elle se manifeste par le décollement progressif des petites particules de pâte qui ont souvent la forme des petites écailles [Neville, 1995]. La fissuration interne du béton diminue la performance du béton en réduisant ses propriétés mécaniques et son imperméabilité. Un béton fortement attaqué par le gel peut perdre toute sa cohésion [Neville, 1995].

Les deux mécanismes de dégradation par la fissuration interne sont les pressions hydrauliques et les pressions osmotiques. Selon le modèle des pressions hydrauliques, l'eau commence à geler dans un pore capillaire, son volume augmente de 9% et l'eau en excès doit être expulsée. La formation de glace est graduelle en fonction du diamètre des pores et de la présence des substances en solution dans l'eau. Cette formation provoque une pression hydraulique d'une intensité variable qui dépend de la longueur de trajet et de la perméabilité de pâte située entre le pore qui gèle et un vide qui peut accepter l'eau expulsée. Pour le modèle des pressions osmotiques, l'eau a tendance à se diriger vers les sites de formation de glace plutôt que d'y être expulsée. Lorsque la température s'abaisse au-dessous de 0 C°, la formation de glace commence dans les plus gros pores. Le même phénomène se produit dans les plus petits pores quand la température devient plus basse. Donc, l'eau des petits pores a tendance à se diriger vers les plus gros pores pour rééquilibrer les concentrations de la solution non gelée. Si le pore est plein, il se forme des pressions osmotiques qui dépassent la résistance en traction du béton et, par conséquent, elles peuvent fissurer la pâte [Gagné, 2000].

Pour que le béton soit résistant à la fissuration interne, un bon réseau des bulles d'air est requis dont le facteur d'espacement (L^{-}) est entre 200 et 250 μm . Certains bétons à haute performance ($E/L \leq 0,35$) peuvent être résistants au gel-dégel sans la présence d'un bon réseau des bulles d'air $L^{-} \geq 500 \mu\text{m}$ à cause du faible rapport E/L [Marchand et al., 1994].

L'utilisation des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier ne produit pas une amélioration significative sur la performance du béton face aux cycles de gel-dégel. [Pigeon et al., 1987].

Selon la norme ASTM C260, le béton est considéré résistant aux cycles de gel-dégel si son facteur de durabilité est supérieur à 80% après 300 cycles de gel-dégel. Les bétons binaires incorporant 20% de la poudre de verre et les ternaires proportionnés avec 20% de verre et incorporant de la fumée de silice ou de laitier ou de métakaolin présentent des facteurs de durabilité supérieurs à 80% après être exposés à 300 cycles de gel – dégel. Tous ces bétons sont formulés soit avec un rapport E/L de 0,40 ou 0,55. Ces bétons ont montré un bon réseau des bulles d'air avec un facteur d'espacement ($L^{\bar{}}$) inférieur à 240 μm [Aladdine, 2009]. Ce comportement des bétons binaires incorporant de la poudre de verre face aux cycles de gel- dégel a été confirmé dans une autre étude effectuée par [Zidol, 2009]. Les bétons incorporant 20% et 30% de la poudre de verre et proportionnés avec des rapports E/L de 0,40 ou 0,55 présentent des excellents facteurs de durabilité ($FD \geq 100\%$) [Zidol, 2009].

2.2.7 Résistance à l'écaillage

L'écaillage est un phénomène courant en Amérique du Nord. Il se produit dans les régions de forte intensité de neige lorsqu'on utilise des sels de déglçage, comme le Na Cl et Ca Cl₂. La présence de Na Cl en solution dans les pores de la pâte peut augmenter le degré de saturation de la pâte proche de la surface ce qui entraîne des dommages dus au gel [Aitcin, 2001]. Plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine de ce phénomène notamment; le modèle de pressions hydrauliques, des pressions osmotiques, de choc thermique et le gel couche par couche.

Selon le modèle des pressions hydrauliques, l'intensité des pressions hydrauliques est principalement liée à la quantité d'eau qui gèle lors des cycles thermiques, le degré de saturation et la concentration en ions de la solution contenue dans les pores. Un degré de saturation élevé proche de la surface pourra favoriser la formation d'une grande quantité de glace. Cette quantité de glace est liée aussi au taux de concentration de sel de déglçage. Puisque ce taux est faible, il y aura plus de dommages liés à l'écaillage parce qu'il y aura plus de glace qui se forme lors de gel [Gagné, 2000].

Selon le modèle des pressions osmotiques, les dommages sont surtout localisés près de la surface, car les pressions osmotiques y sont plus intenses en raison de la forte concentration en sels fondants. Pour des très faibles concentrations en sels fondants, les contraintes internes seraient générées par les pressions hydrauliques et très peu par celles osmotiques. En cas d'augmentation de sels fondants, l'importance des pressions hydrauliques diminue, car il y aura moins de glace qui se forme proche de la surface, ce qui,

favorise le développement des pressions osmotiques [Fagerlund, 1975] a constaté que les pressions internes générées par le double effet des pressions hydrauliques et osmotiques soient maximales pour une concentration en Na Cl voisine de 2,50%.

Selon le modèle de choc thermique, un fort gradient thermique peut se produire au moment du dégel lorsqu'on applique des sels de déglçage. Ce dégel très rapide nécessite une grande quantité de chaleur qui doit être principalement extraite du béton sous la surface. Cette diminution importante de la température de la surface lors de dégel cause des fortes contraintes de traction (entre 1 à 9 MPa) qui peuvent dépasser la résistance en traction du béton [Gagné, 2000].

Selon le modèle de gel couche par couche, la concentration des agents déglçant à l'intérieur du béton n'est pas constante en fonction de la profondeur du béton. Lorsque le gel survient, ce sont d'abord les couches contenant la moins grande teneur en ions qui gèlent en premier. Ces couches sont situées d'une part toute proche de la surface et, d'autre part, plus en profondeur. Il y a une couche intermédiaire qui gèle après les deux autres couches à cause de sa forte teneur en ions. Ce phénomène peut provoquer des tensions internes en raison de la dilatation différente des couches gelées et non gelées [Gagné, 2000].

Pour des bétons formulés avec un rapport E/L supérieur à 0,40, la présence d'un bon réseau de bulles d'air est inévitable pour que le béton soit plus ou moins résistant à l'écaillage. Pour un rapport E/L aux environs de 0,25, le béton pourra être résistant à l'écaillage sans avoir la protection d'un réseau de bulles d'air [Gagné, 1992]. Par ailleurs, les bétons de résistance normale contenant moins de 10% de la fumée de silice en remplacement du ciment résistent bien aux sels de déglçage lorsqu'ils sont protégés par un bon réseau de bulles d'air [Gagné et al., 1993].

Les bétons contenant de cendres volantes ne donnent pas une bonne performance contre l'écaillage. Ce phénomène s'explique par la durée relativement courte de mûrissement recommandée par la norme ASTM C672, ce qui ne permet pas aux cendres volantes de participer à la densification de la pâte avant la première exposition de gel [Bilodeau et al., 1994]. Cette tendance est confirmée par [Bouzoubâa et al., 2008] en étudiant deux bétons formulés avec un rapport E/L de 0,41 et contenant 25% et 35% de cendres volantes de classe F. Les résultats montrent des faibles résistances contre l'écaillage mesuré selon la norme ASTM C672.

Pour des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre de type (6 x 25) et subit à 14 jours de mûrissement humide, la perte de masse après 56 cycles de

gel-dégel est supérieure à 500 gm /m² (limite maximale permise par les normes BNQ). Par contre, ceux incorporant 20% et 30% de poudre de verre de type (9 x 25) engendrent une perte de masse légèrement inférieure à 500 gm /m² [Zidol, 2009]. Dans le cas de 77 jours de mûrissement humide, la perte de masse après 56 cycles de gel-dégel est largement supérieure à 500 gm /m². Ce comportement face aux sels de déglacage après 77 jours de mûrissement humide peut être lié aux caractéristiques physiques de la surface, notamment, la porosité, la perméabilité, la microfissuration et le degré de saturation de surface. Un degré de saturation élevé favorise la formation d'une plus grande quantité de glace [Zidol, 2009]. Tous les mélanges incorporant de la poudre de verre présentent une perte de masse largement supérieure à celle du béton témoin [Zidol, 2009].

Pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40, les bétons incorporant de la poudre de verre présentent une perte de masse similaire ou légèrement supérieure à celle du béton témoin. Cette perte se situe dans la limite maximale permise par les normes BNQ pour des bétons mûris pendant 14 ou 77 jours. Cette performance met en évidence l'absence d'effet négatif de la poudre de verre sur la résistance à l'écaillage pour des bétons ayant un faible rapport E/L comparativement aux autres ajouts cimentaires [Zidol, 2009].

La perte de masse pour les bétons binaires et ternaires avec de la poudre de verre formulés avec un rapport E/L de 0,55 est élevée après 50 cycles de gel-dégel. Cette perte diminue, mais demeure élevée quand l'essai est effectué à partir de l'âge de 91 jours [Aladdine, 2009]. La perte de masse après 28 jours de mûrissement humide pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant de la poudre de verre est présentée dans les figures 2-14 [Aladdine, 2009]. Ces résultats montrent que ces bétons affichent un meilleur comportement face à l'écaillage [Aladdine, 2009].

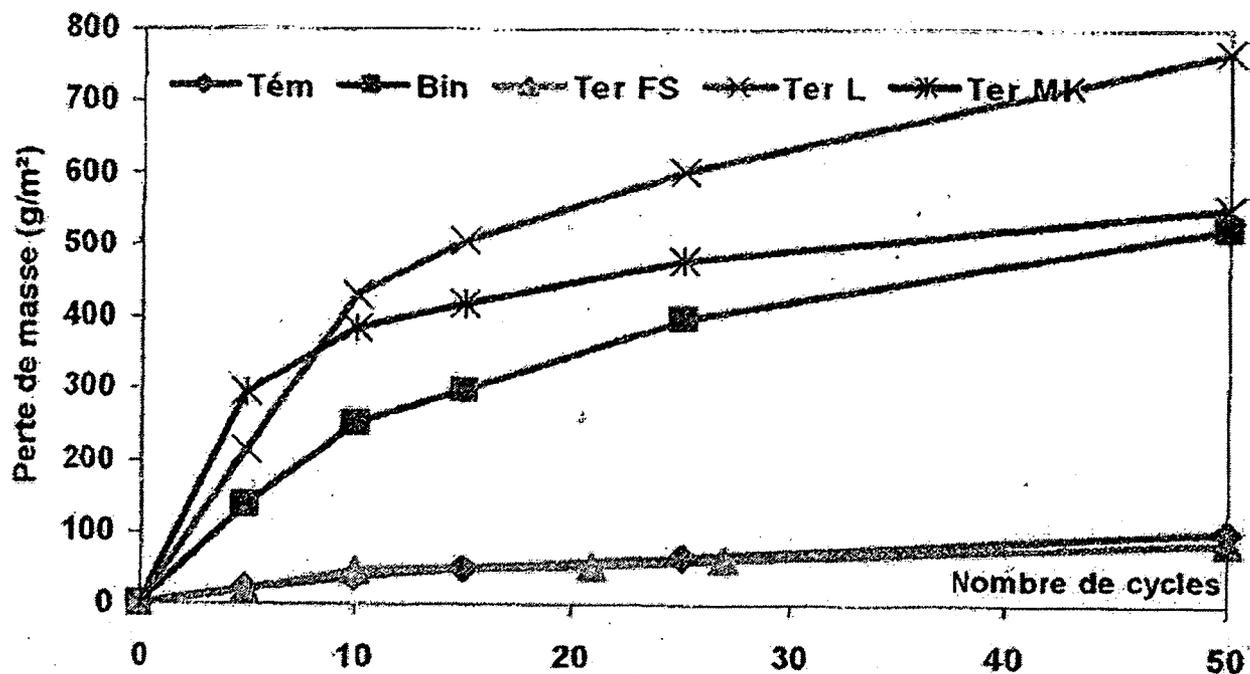


Figure 2-14: Écaillage des mélanges après 28 jours de mûrissement ($E/L=0,40$) [Aladdine, 2009].

2.2.8 Retrait du béton

Le retrait est la cause la plus fréquente des changements de volume de la pâte et il cause aussi une contraction de la pâte (ou du béton). Il est très souvent à l'origine des fissures que l'on retrouve fréquemment dans presque tous les types d'ouvrages en béton. Les fissures de retrait sont provoquées par la contraction d'une pièce de béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés. Cette diminution du volume provoque des contraintes internes de traction qui peuvent faire fissurer la pâte [Gagné, 2000].

Il existe trois principaux types de retrait, le retrait plastique, le retrait endogène et le retrait de séchage.

- **Le retrait plastique**

Le retrait plastique peut affecter le béton à très jeune âge (pendant la prise initiale). Il est causé par une évaporation très rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe. Le retrait plastique est généralement associé à une technique de cure mal adaptée aux conditions climatiques [Neville, 1995].

- **Le retrait endogène**

Le retrait endogène est provoqué par la contraction Le Châtelier. Il résulte du fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau+ciment). Ce processus entraîne une diminution de volume après la prise du béton. Il fait apparaître des vides dans la pâte de ciment hydratée (Capillaires vides) qui ont pour effet de diminuer le taux d'humidité interne (autodessiccation). Il y a alors un processus de réorganisation de l'eau dans la pâte de ciment ce qui provoque une contraction que l'on désigne par retrait endogène [Aitcin, 2001].

L'ajout de la poudre de verre finement broyé dans les bétons binaires et ternaires avec un rapport E/L de 0,40 affine les pores et diminue la porosité [Aladdine, 2009]. Cet affinage provoque la formation des ménisques, ce qui augmente le retrait de la pâte. Il n'est pas possible d'éliminer ce retrait qui est un phénomène très normal dans les bétons à faible rapport E/L. La prévention contre une fissuration peut être assurée par un bon mûrissement à l'eau [Aitcin, 2001].

- **Le retrait de séchage**

Le retrait de séchage est une diminution du volume de la pâte provoquée par une réorganisation de l'eau. Le retrait de séchage survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible du retrait. La cause principale du retrait de séchage est l'assèchement progressif de la pâte de ciment. Lorsqu'on abaisse graduellement le taux d'humidité, on observe que certaines catégories des pores s'assèchent en premier [Neville, 1995]. Dès que l'humidité est inférieure à 100%, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($\geq 0,05 \mu\text{m}$) qui commence à s'échapper. Cette perte d'eau provoque relativement peu de retrait. Pour des taux d'humidité compris entre 50% et 90%, c'est l'eau non-libre qui s'évapore. Cette évaporation provoque un retrait important [Gagné, 2000]. Lorsque le taux d'humidité devient inférieur à 50%, on commence à évaporer l'eau adsorbée dans les

petits capillaires. Ce processus produit des tensions capillaires qui compriment les parois des pores et provoquent une diminution du volume de la pâte [Gagné, 2000].

Pour un taux d'humidité inférieur à 30%, l'eau zéolithique devient instable et commence à s'évaporer. L'eau zéolithique est responsable des pressions de disjonction qui écartent les feuillettes de C-S-H. Si cette eau disparaît, le système se contracte et le volume diminue. Il est très difficile de retirer l'eau combinée chimiquement. C'est pour cette raison qu'on la désigne souvent par eau non-évaporable [Gagné, 2000].

Des bétons binaires proportionnés avec des rapports E/L de 0,30, 0,34 et 0,40 et incorporant différentes proportions de cendres volantes (Classe F) (de 20% à 60%) sont comparés avec des bétons témoins formulés avec les mêmes rapports E/L [Kumar et al., 2007]. L'incorporation de cendres volantes comme un remplacement partiel du ciment portland a des effets bénéfiques sur la réduction de retrait de séchage [Kumar et al., 2007]. L'augmentation de la teneur en cendres volantes diminue le retrait de séchage pour le même rapport E/L. Les résultats montrent aussi que la diminution du rapport E/L pour le même taux d'incorporation de cendres volantes diminue le retrait. La diminution de retrait pour le béton incorporant 50% des cendres volantes par rapport au témoin est de 30,5%, 32% et 49,5% pour les rapports E/L de 0,40, 0,34 et 0,30 respectivement. La diminution du retrait provoqué par l'augmentation de taux de cendres volantes et la diminution du rapport E/L est attribuée à la diminution de volume de la pâte du ciment [Kumar et al., 2007].

La figure 2-15 présente les valeurs du retrait au séchage pour des bétons incorporant différentes proportions de la poudre de verre (de 10% à 40%) [Shayan et al., 2004]. Ils ont observé que ces bétons engendrent un retrait inférieur à 0,075% à l'âge de 56 jours (limite maximale permise par les normes australiennes) [Shayan et al., 2004].

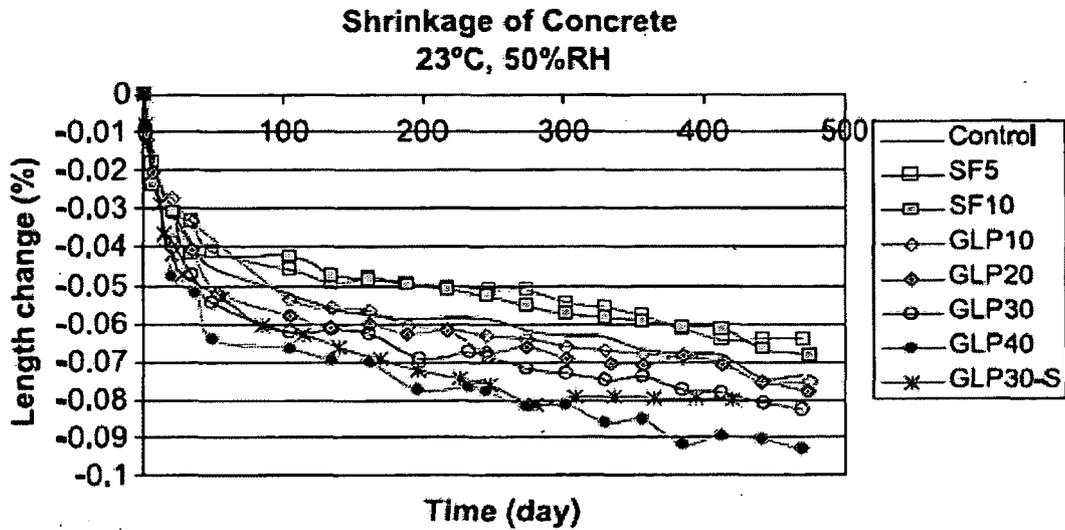


Figure 2-15: Retrait au séchage pour des bétons incorporant de la poudre de verre [Shayan et al., 2004]
 Ces résultats sont confirmés par une étude menée par [Shayan et al., 2006] comme présenté dans la figure 2-16. Ils ont observé que le mélange incorporant 20% de poudre de verre affiche un retrait légèrement inférieur à celui de témoin. Par contre, le mélange incorporant 30% de poudre de verre produit un retrait supérieur à celui de témoin, mais il reste inférieur à 0,075% à l'âge de 56 jours [Shayan et al., 2006].

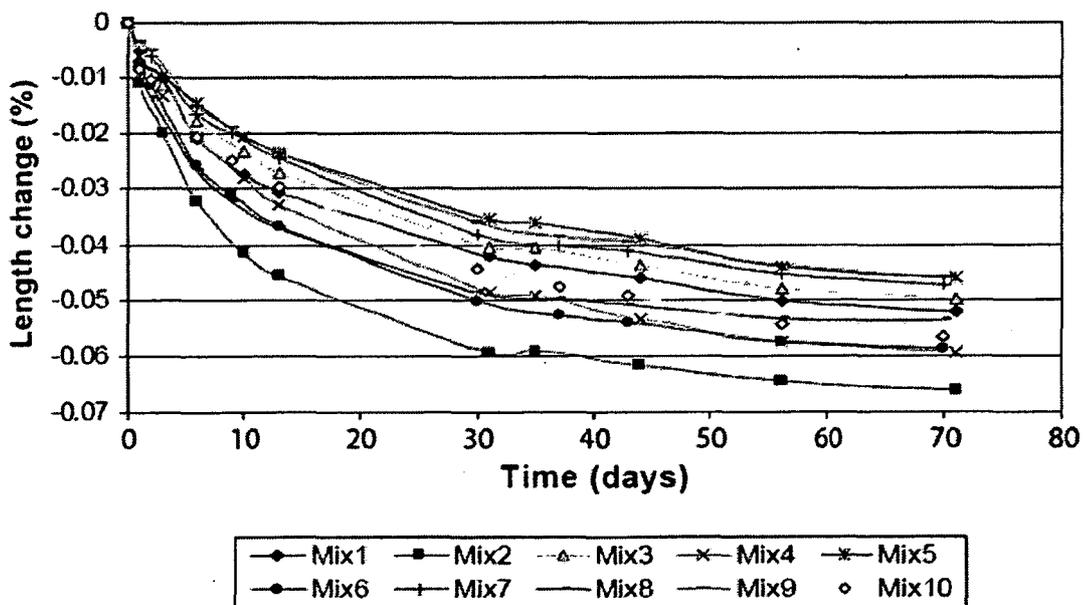


Figure 2-16: Retrait au séchage pour différents bétons [Shayan et al., 2006]

Pour les bétons binaires et ternaires proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% de la poudre de verre, un léger gonflement peut être observé entre le premier jour de démoulage et le 28 e jour. Ce gonflement peut être causé par l'absorption d'eau lors du mûrissement à l'eau [Aladdine, 2009]. Le gonflement dans les bétons incorporant des ajouts cimentaires est inférieur à celui du béton témoin à l'exception du ternaire formulé avec la fumée de silice qui présente le plus grand gonflement [Aladdine, 2009]. Il est dû probablement à sa grande porosité par rapport aux autres bétons avec des ajouts cimentaires. Les bétons binaires et ternaires ont un retrait supérieur à celui du béton témoin à tous les âges [Aladdine, 2009].

Pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de poudre de verre, les valeurs de retrait au séchage sont similaires à celui du béton témoin. Ces résultats signifient que la poudre de verre n'a pas un effet significatif sur le retrait du séchage [Zidol, 2009]. La figure 2-17 présente des valeurs de retrait au séchage pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% du verre [Zidol, 2009]. Ils produisent des valeurs de retrait du séchage supérieures à celle du témoin à tous les âges [Zidol, 2009]. Cette augmentation de retrait par rapport au témoin semble refléter un effet combiné du retrait du 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 [Aitcin, 2001].

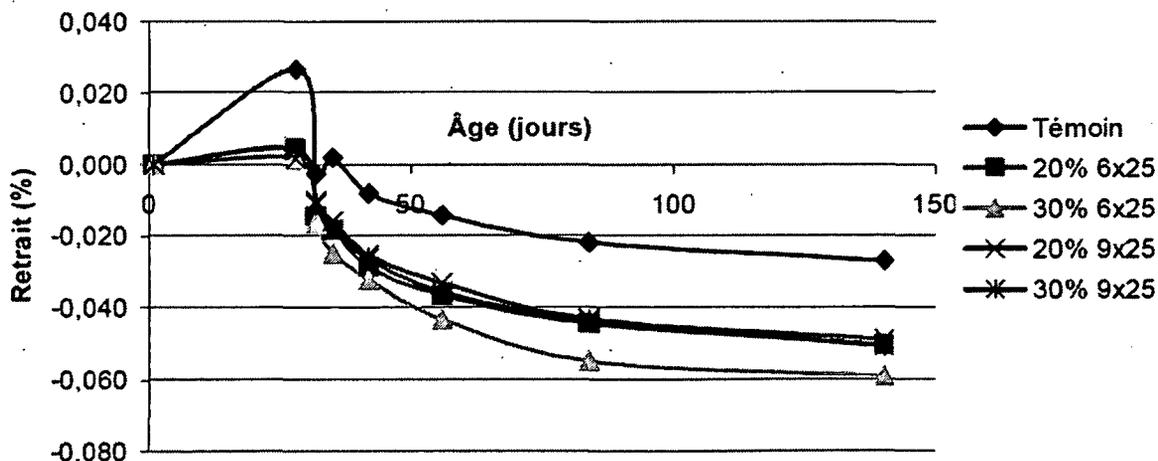


Figure 2-17: Retrait au séchage pour des bétons à haute performance (E/L=0,40) [Zidol, 2009].

2.3 Synthèse de la recherche bibliographique

À travers cette recherche bibliographique, on peut conclure les observations suivantes :

- L'incorporation de la poudre de verre réduit le dosage en agent entraîneur d'air dans les bétons conventionnels proportionnés avec un rapport E/L de 0,55. Elle provoque également une réduction de l'affaissement dans les bétons ordinaires proportionnés avec E/L de 0,55.
- Le remplacement partiel du ciment portland par la poudre de verre provoque un développement important des propriétés mécaniques du béton dans le temps.
- Le développement des propriétés mécaniques pour les bétons incorporant de la poudre de verre est plus significatif dans le cas des rapports E/L élevés.
- L'incorporation de la poudre de verre dans les bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 engendre des valeurs des propriétés mécaniques plus élevées que celles du béton témoin aux âges plus avancés.
- L'incorporation de la poudre de verre dans le béton provoque une réduction significative de la perméabilité aux ions chlorures par rapport au béton témoin.
- L'utilisation de la poudre de verre dans les bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 provoque une amélioration de la résistance du béton contre les cycles de gel-dégel en présence des sels de déglaceage.

Mais, tous ces résultats ont été observés sur des bétons formulés avec des paramètres de formulation donnés plutôt qu'une approche mathématique. Alors, le taux de remplacement optimal du ciment portland par la poudre de verre peut être varié en fonction de différents paramètres de proportion tels que; le rapport E/L et le dosage en liant (kg/m^3) ainsi que leurs interactions. Il est difficile de déterminer ces effets par les méthodes conventionnelles. L'utilisation des plans d'expériences représente une approche pertinente pour la compréhension de l'effet des différents paramètres de formulation sur les différentes caractéristiques du béton. Cette approche statistique représente un outil pertinent pour maximiser le potentiel d'utilisation de la poudre de verre dans le béton.

Chapitre 3 – Le programme expérimental et les procédures d'essais

3.1 Le programme expérimental

Le programme expérimental se compose de deux phases : la première phase consiste à étudier l'effet des différents paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons incorporant de la poudre de verre. Il s'agit de modéliser l'effet des trois différents paramètres de formulation ainsi que leurs interactions sur les propriétés du béton en utilisant un plan d'expériences. La deuxième phase porte sur la caractérisation et la durabilité des mélanges optimisés. Cette étude est consacrée à déterminer les propriétés mécaniques et les caractéristiques de durabilité des mélanges optimisés.

3.1.1 Phase 1 : Effet des différents paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton incorporant de la poudre de verre

Dans cette phase, on étudie l'effet du rapport Eau/Liant (E/L), le pourcentage de la poudre de verre (%PV) et le dosage en liant (Kg/m^3) ainsi que leurs interactions sur le développement de la résistance en compression dans le temps, la perméabilité aux ions chlorures à différents âges et le coût unitaire du béton. Un plan factoriel à deux niveaux a été établi pour modéliser l'effet de ces trois paramètres et évaluer leur effet sur les réponses citées ci-dessus. Les valeurs des paramètres étudiés dans ce plan factoriel sont présentées dans le tableau 3-1.

Tableau 3.1 : Les valeurs absolues des paramètres étudiées

Paramètres	Valeur absolue
E/L	0.265 - 0.685
Poudre de Verre (%PV)	0% - 50%
Dosage en liant (kg/m^3)	308 - 442

3.1.2 Phase 2 : Caractérisation et durabilité des mélanges optimisés

Dans cette phase, sept bétons sont confectionnés, trois formulations à l'intérieure du domaine expérimental (i.e. bétons binaires incorporant différentes proportions de la poudre de verre) et 3 bétons ternaires formulés avec différents types des ciments ternaires et un béton témoin (100% du ciment portland). L'objectif de cette partie est de valider la performance (les propriétés mécaniques et de durabilité) des bétons binaires et ternaires avec celles du béton témoin. Les trois bétons binaires contiennent respectivement 15%, 20% et 25% de la poudre de verre comme un remplacement partiel du ciment portland. Par contre, les trois bétons ternaires sont formulés avec un ciment ternaire composé de cendres volantes et de la fumée de silice (TerC³), un ciment ternaire composé de laitier et de la fumée de silice (Tercem3000) et un mélange ternaire incorporant 20% de la poudre de verre et 5% de fumée de silice. Les bétons étudiés dans cette phase sont formulés avec un rapport E/L de 0,45 et un dosage en liant de 375 kg/m³. Les propriétés mécaniques et les caractéristiques de durabilité étudiées dans cette phase sont présentées dans le tableau 3-2.

Tableau 3.2: Propriétés mesurées pour les mélanges de phase 2

Caractéristiques	Propriétés mesurées	Âge de mesure
État Frais	Affaissement	10 minutes et 60 minutes
	Teneur en air	
	Masse volumique (Kg/m ³)	
Propriétés mécaniques	Résistance en compression (MPa)	1, 7, 28,56 et 91 jours
	Résistance en traction (MPa)	28 et 91 jours
	Résistance en Flexion (MPa)	
	Module d'élasticité (GPa)	
Durabilité	Résistance au gel-dégel (300 cycles)	
	Résistance à l'écaillage (56 cycles)	
	Mesure des caractéristiques du réseau des bulles d'air	
	Perméabilité aux ions chlores (Coulomb)	28,56 et 91 jours
	Retrait au Séchage	

3.2 La méthode des plans d'expériences

L'expérimentateur qui est dans un laboratoire de béton ou dans un tout autre secteur est préoccupé par cette question : est-ce que j'utilise la meilleure stratégie pour réaliser mes recherches? En général, dans un laboratoire de béton, on sait que l'augmentation du rapport E/L peut diminuer la résistance en compression et augmenter la perméabilité aux ions chlorés. Par contre, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre peut provoquer une diminution de la perméabilité aux ions chlorés et peut également affecter la résistance en compression surtout au jeune âge à cause de sa faible réactivité pouzzolanique [Zidol, 2009]. La procédure utilisée pour déterminer les dosages optimaux consiste à fixer l'un des deux paramètres (E/L et %PV) et varier l'autre paramètre à fin d'obtenir un compromis entre la résistance en compression et la perméabilité aux ions chlorés. Mais, dans ce cas, peu d'information est acquise dans le cas de variation simultanée des paramètres étudiés [Sado et al., 1991].

Il est alors important de choisir une méthode avec la meilleure précision possible sur les résultats ce qui permet d'avoir une meilleure compréhension de l'effet des paramètres étudiés et de leurs interactions, une meilleure modélisation mathématique des résultats, et une bonne interprétation des phénomènes observés.

Cette méthode existe et consiste en une structuration des données et une interprétation statistique des résultats. Cette méthode est la technique des plans d'expériences [Montgomery, 2009; Yahia, 1997; Sado et al., 1991; Golberg et al., 2004].

3.2.1 Les plans factoriels composites à deux niveaux

La technique des plans d'expériences est une approche statistique qui est efficace pour diminuer le nombre des mélanges effectués sans affecter la qualité des résultats. La méthode statistique utilisée dans ce projet est le plan factoriel composite à deux niveaux (+1 et -1). Chaque paramètre est fixé à chacun de ces deux niveaux et le modèle statistique est appliqué autant à l'intérieure que sur les frontières du domaine expérimental modélisé. Le nombre des mélanges est calculé selon l'équation suivante (3,1);

$$N_f = 2^n \quad (3,1)$$

n : nombre des paramètres étudiés, N_f : nombre des mélanges factoriels

Le plan factoriel composite à deux niveaux utilisé pour la réalisation de cette étude est présentée dans la figure 3-1. Les valeurs codées des trois facteurs modélisés sont présentées dans cette figure.

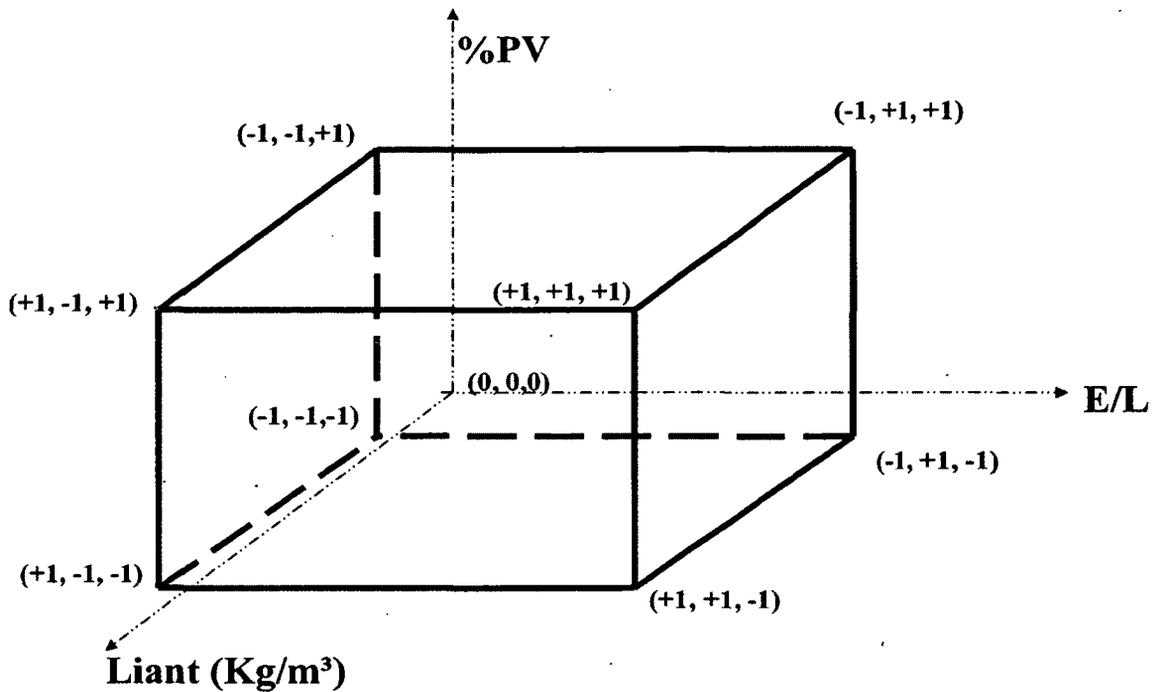


Figure 3-1: Le plan factoriel composite à deux niveaux utilisé dans cette étude

L'approche d'un plan d'expérience est d'assurer un modèle linéaire. Après vérification, si le modèle linéaire n'est pas vérifié, le domaine expérimental est élargi pour tenir compte des effets quadratiques et établir les modèles non-linéaires. Chaque facteur est ainsi varié entre (+ α et - α) au lieu de (+ 1 et - 1).

La valeur de α est calculée en utilisant l'équation suivante (3,2):

$$\alpha = (N_f)^{0.25} = (8)^{0.25} = 1,68 \quad (3,2)$$

N_f : Nombre des points factoriels

Chaque facteur est évalué à cinq niveaux (+1,68), (+1), (0), (-1) et (-1,68).

Pour déterminer les valeurs codées pour chaque paramètre à l'intérieure du domaine statistique, on utilise les formules ci-dessous.

$$E/L \text{ codé} = (E/L \text{ absolu} - 0,475) / 0,125$$

$$\%PV \text{ codé} = (\%PV \text{ absolu} - 25\%)/15\%$$

$$\text{Liant codé} = (\text{Liant absolu} - 375)/40$$

La réalisation de ce plan factoriel permet de déterminer l'effet du rapport E/L, %PV, dosage en liant ainsi que l'interaction entre les différents facteurs sur les réponses étudiées (la résistance en compression, la perméabilité aux ions chlore et le coût unitaire). L'analyse statistique des modèles a été réalisée à l'aide du logiciel Design Expert 6.0.

Les mélanges étudiés dans ce plan d'expériences sont présentés dans le tableau 3-3.

Tableau 3.3: Les mélanges du plan factoriel

Mélange	Valeurs absolues			Valeurs codées		
	E/L	%PV	liant (kg/m ³)	E/L	%PV	liant (kg/m ³)
F1	0,35	10%	335	-1	-1	-1
F2	0,35	10%	415	-1	-1	1
F3	0,35	40%	335	-1	1	-1
F4	0,35	40%	415	-1	1	1
F5	0,6	10%	335	1	-1	-1
F6	0,6	10%	415	1	-1	1
F7	0,6	40%	335	1	1	-1
F8	0,6	40%	415	1	1	1
C1	0,475	25%	375	0	0	0
C2	0,475	25%	375	0	0	0
C3	0,475	25%	375	0	0	0
A1	0,475	25%	308	0	0	-1,68
A2	0,475	25%	442	0	0	1,68
A3	0,475	0%	375	0	-1,68	0
A4	0,475	50%	375	0	1,68	0
A5	0,265	25%	375	-1,68	0	0
A6	0,685	25%	375	1,68	0	0

Ou F : représente les points factoriels ; C : représente les points centraux et A : représente les points axiaux.

Les réponses dans le cas d'un modèle linéaire sont présentées par l'équation (3,3).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \beta_{12} X_{12} + \beta_{ji} X_{ji} + E \quad (3,3)$$

Les réponses dans le cas d'un modèle quadratique sont présentées par l'équation (3,4).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \beta_{12} X_{12} + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \dots + E \quad (3,4)$$

Y : Réponse prédite (Variable dépendante), β_1 : Contribution de variable indépendante (X1) sur la réponse prédite (Y), β_0 : La valeur moyenne prédite des points centraux, X_i : Variable indépendante et, X_{12} : interaction entre deux variables indépendantes qui sont (X1) et (X2).

La signification d'une variable indépendante est déterminée selon deux hypothèses : l'hypothèse nulle $\beta_i = 0$ et l'hypothèse alternative $\beta_i \neq 0$. Quand le variable indépendante a un effet significatif sur la réponse (Y), l'hypothèse nulle est rejetée et l'hypothèse alternative est acceptée. L'application d'une des deux hypothèses se fait selon les tests de probabilités statistiques effectués sur chaque paramètre étudié ainsi que sur l'interaction entre deux paramètres différents. Les tests de probabilité utilisés dans ce projet sont Fisher test et Student avec un niveau de confiance de 90% [Golberg et al., 2004; Chanvillard et al., 1993; Montgomery, 2009].

Le niveau de confiance (1- α) ou α représente le degré de risque n'est pas fixe pour toutes les applications, par exemple; dans le monde médical ou dans l'industrie pharmaceutique, un niveau de confiance de 95 % ou 99% est requis pour avoir le moins de risques possible sur la réponse finale. Par contre, dans le domaine du béton, un niveau de confiance de 90% semble être suffisant pour assurer une bonne précision. Un niveau de confiance de 90% indique qu'on a moins de 10% de risque qu'un tel paramètre n'a pas un effet significatif sur la réponse finale [Golberg et al., 2004; Montgomery, 2009].

Trois points centraux sont utilisés dans ce projet pour estimer l'erreur expérimental sur chaque réponse mesurée [Montgomery, 2009].

Les modèles établis dans cette étude sont présentés dans le tableau 3-4.

Tableau 3.4: Les différentes réponses étudiées

Réponse	Âge	Propriétés Mécaniques	Durabilité
Résistance en compression (MPa)	1 jour		
	7 jours		
	28 jours		
	91 jours		
	180 jours		
	1 an		
Perméabilité aux ions chlorés (Coulombs)	28 jours		
	56 jours		
	91 jours		
	180 jours		
	1 an		
Coût unitaire (\$/t) Pour différent prix unitaire de la poudre de verre			

3.2.2 La validation des modèles statistiques

Des mélanges supplémentaires sont préparés à l'intérieur du domaine expérimental pour évaluer la fiabilité des modèles statistiques établis. La fiabilité du modèle statistique est établie en comparant les valeurs mesurées aux valeurs prédites par les modèles établis (coefficient de corrélation (R^2)) pour les mélanges de validation. Plus le coefficient de corrélation (R^2) est élevé, plus le modèle est fiable. Les valeurs idéales de (R^2) sont situées entre 0,90 et 1. Une approche plus précise est utilisée pour déterminer la fiabilité des modèles statistiques, celle-ci consiste à avoir une relation mathématique entre les valeurs mesurées et prédites pour chacune des réponses. L'équation peut s'écrire comme :

$$\text{Prédite} = A (\text{mesurée}) \quad (3,5)$$

A : représente la différence entre les 2 valeurs

Plus la valeur de (A) est proche de 1, plus que le modèle est précis.

Deux types de bétons ont été confectionnés à fin de valider les modèles statistiques. Un béton ordinaire avec un rapport E/L de 0,55 et un béton à haute performance avec un rapport E/L de 0,40. Les mélanges effectués incorporent différents pourcentages de poudre de verre (de 0% à 50%).

Dans le cas d'un modèle linéaire, 8 mélanges de validation sont utilisés (tableau 3-5).

Tableau 3.5: Les bétons de validation pour les modèles linéaires

Mélange	E/L absolu	%PV absolu	Liant absolu	E/L codé	%PV codé	Liant codé
V1	0,40	10%	400	-0,60	-1	0,625
V2	0,40	20%	400	-0,60	-0,333	0,625
V3	0,40	30%	400	-0,60	0,333	0,625
V4	0,40	40%	400	-0,60	1	0,625
V5	0,55	10%	350	0,60	-1	-0,625
V6	0,55	20%	350	0,60	-0,333	-0,625
V7	0,55	30%	350	0,60	0,333	-0,625
V8	0,55	40%	350	0,60	1	-0,625

Par contre, dans le cas d'un modèle quadratique, 12 mélanges de validation sont utilisés pour la validation du modèle (tableau 3-6).

Tableau 3.6: Les bétons de validation pour les modèles quadratiques

Mélange	E/L absolu	%PV absolu	Liant absolu	E/L codé	%PV codé	Liant codé
V1	0,40	10%	400	-0,60	-1	0,625
V2	0,40	20%	400	-0,60	-0,333	0,625
V3	0,40	30%	400	-0,60	0,333	0,625
V4	0,40	40%	400	-0,60	1	0,625
V5	0,55	10%	350	0,60	-1	-0,625
V6	0,55	20%	350	0,60	-0,333	-0,625
V7	0,55	30%	350	0,60	0,333	-0,625
V8	0,55	40%	350	0,60	1	-0,625
V9	0,40	0%	400	-0,60	-1,68	0,625
V10	0,40	50%	400	-0,60	1,68	0,625
V11	0,55	0%	350	0,60	-1,68	-0,625
V12	0,55	50%	350	0,60	1,68	-0,625

3.2.3 Exploitation des modèles statistiques

Cette étape est essentielle pour étudier l'effet de chaque paramètre sur les propriétés du béton. Des courbes iso-réponse sont déterminées pour chaque réponse à fin de faciliter l'optimisation de formulation avec les propriétés requises. Des courbes qui représentent des relations entre deux différentes réponses sont essentielles pour établir des corrélations entre les différentes réponses.

3.3 Les procédures d'essais

Dans cette section, on présente tous les essais qui ont été réalisés durant les deux phases de ce projet. Le tableau 3-7 récapitule les différents essais effectués et les normes correspondantes utilisées.

Tableau 3.7:Récapitulation des essais effectués

Propriétés	Propriétés mesurées	Normes utilisées	Remarques
État Frais	Affaissement	ASTM C143	
	Teneur en air	ASTM C231	
	Masse volumique (Kg/m ³)	ASTM C138	
Propriétés mécaniques	Résistance en compression (MPa)	ASTM C39	
	Résistance en traction (MPa)	ASTM C496	Phase 2 seulement
	Résistance en flexion (MPa)	ASTM C78	Phase 2 seulement
	Module d'élasticité (GPa)	ASTM C469	Phase 2 seulement
Durabilité	Résistance au gel-dégel	ASTM C666	Phase 2 seulement
	Résistance à l'écaillage	BNQ2621-900	Phase 2 seulement
	Mesure du réseau des bulles d'air	ASTM C457	Phase 2 seulement
	Perméabilité aux ions chlores (Coulomb)	ASTM C1202	
	Retrait au Séchage	ASTM C157	Phase 2 seulement

La réalisation des mélanges du plan factoriel et de validation a été effectuée avec des gâchées de 50 litres de béton, chaque mélange a été fait au moins 3 fois à fin d'ajuster la teneur en air qui doit être entre 5% et 8% à 10 minutes après le contact eau-liant. Une fois que la teneur en air est déterminée, l'échantillonnage s'est fait sur des cylindres ayant des dimensions de 100mm x 200mm pour mesurer la résistance en compression et la perméabilité aux ions chlores aux âges indiqués dans le tableau 3-4.

Avant de réaliser les travaux de la phase 2; des gâchées d'essai de 25 litres sont réalisées pour ajuster les propriétés à l'état frais notamment un affaissement de $80 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ et une teneur en air entre 5% et 8% à 10 minutes après le contact eau-liant. Une fois que les propriétés à l'état frais sont adéquates, une gâchée de 120 litres est réalisée pour effectuer l'échantillonnage au complet. L'échantillonnage a été fait sur des cylindres ayant des dimensions de $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ pour mesurer la résistance en compression, la résistance en traction, le module d'élasticité, les réseaux des bulles d'air et la perméabilité aux ions chlorures aux âges indiqués dans le tableau 3-2. Il a été fait aussi sur 6 poutres ayant des dimensions de $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ pour mesurer la résistance en flexion. Deux poutres ayant des dimensions de $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 355 \text{ mm}$ ont été coulées pour mesurer la résistance aux cycles de gel-dégel selon les normes ASTM C666 et 3 poutres avec des dimensions $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ sont coulées pour mesurer le retrait au séchage selon la norme ASTM C 157. En fin, deux plaques de dimensions de $255 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ sont coulées pour mesurer l'écaillage selon les normes BNQ2621-900 après 56 cycles de gel-dégel.

La procédure de malaxage des gâchées de béton adoptée dans cette étude est la suivante :

- Introduire le sable dans le malaxeur et malaxer pendant 1 minute pour l'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 homogénéisation.
- 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 pendant encore 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 3 minutes additionnelles soit une durée totale de 8 minutes à compter du premier contact entre le liant et l'eau.

3.3.1 Essais sur le béton à l'état frais

La résistance en compression, la perméabilité aux ions chlorures et la résistance contre les cycles de gel-dégel sont des propriétés qui sont toujours requises pour qu'un béton soit utilisé en Amérique du Nord. Puisque le béton passe par une phase plastique durant laquelle il peut être transporté et mis en place, l'étude des propriétés du béton à l'état frais est très importante. Si, le béton ne peut pas être placé correctement, les propriétés désirées à l'état durci ne seront jamais obtenues. Souvent, les propriétés requises d'un béton à l'état frais sont différentes pour chaque application. Les besoins de finition, de mise en place, de pompage et de résistance à la ségrégation définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais [Neville, 1995].

L'utilisation accrue des différents ajouts cimentaires et adjuvants résulte en un comportement rhéologique plus complexe ce qui nécessite des processus de caractérisation appropriés [Mehta, 1998]. Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé à des problèmes de ségrégation et à une faible résistance en compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide et stable ayant d'excellentes propriétés mécaniques. D'ailleurs, les bétons à haute performance sont beaucoup plus visqueux et fluides que les mélanges de bétons ordinaires [Khayat et al., 2000].

Les essais normalisés exigés par les normes ASTM sur le béton à l'état frais et utilisés dans cette étude sont résumés ci - dessous :

➤ Affaissement

L'essai d'affaissement est utilisé pour déterminer la consistance du béton à l'état frais. L'affaissement est mesuré à 10 minutes et à 60 minutes après le contact entre l'eau et le liant. L'équipement utilisé pour réaliser cet essai se compose d'un cône métallique de 300 mm de hauteur, de 200 mm de diamètre de base et de 100 mm de diamètre au sommet, puis d'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 remplit le cône en trois couches de même volume approximativement et pilonné à 25 coups chacune. Après le pilonnage et l'arasement de la dernière couche, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse. 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 supérieur du béton comme présenté dans la figure 3-2.



Figure 3-2: Mesure de l'affaissement du béton selon les normes ASTM C143

➤ **La teneur en air**

Le volume d'air entraîné dans le béton frais peut être mesuré par trois méthodes différentes notamment la méthode gravimétrique, la méthode volumétrique et la méthode pressiométrique. La méthode pressiométrique est généralement utilisée compte tenu de la fiabilité des résultats et de sa meilleure adaptation aux usages de chantier. Elle est réalisée selon les normes ASTM C231. Son principe repose sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Boyle Mariotte. La procédure de cet essai est l'application d'une pression d'air sur un échantillon de béton à l'aide d'une pompe. Le béton est échantillonné dans un contenant ayant un volume de 7,02 litres. Il est échantillonné sur 3 couches ayant un volume approximativement constant et chaque couche est pilonnée 25 fois à l'aide d'une tige en acier. L'appareil utilisé pour la réalisation de cet essai est présenté dans la figure 3-3.

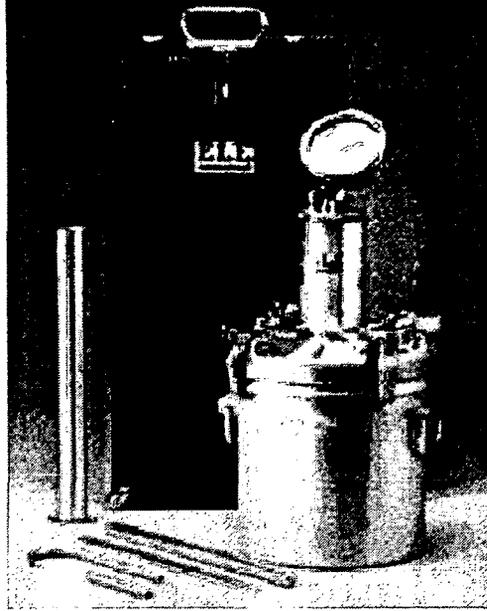


Figure 3-3: Mesure de la teneur en air du béton frais

➤ **La masse volumique**

Le béton ordinaire généralement employé pour les chaussées, les bâtiments et les autres ouvrages a une masse volumique entre 2200 et 2400 kg/m³. La masse volumique du béton varie en fonction de la quantité et de la densité des granulats, des quantités d'air emprisonné ou entraîné, des dosages en eau et en liant.

La masse volumique est déterminée selon les normes ASTM C138. On utilise un contenant ayant un volume de 7,02 litres (même contenant que celui utilisé pour la mesure de la teneur en air). Les séquences de l'essai consistent à remplir le contenant sur 3 couches du béton et pilonner chacune à 25 coups. La dernière couche est bien arasée et l'ensemble est pesé sur une balance calibrée $\pm 0,10$ gm. La masse volumique est le rapport entre la masse du béton pesée sur la balance et le volume de contenant. Elle est toujours donnée par kg/m³.

L'appareil utilisé pour la réalisation de cet essai est bien présenté dans la figure 3-4.

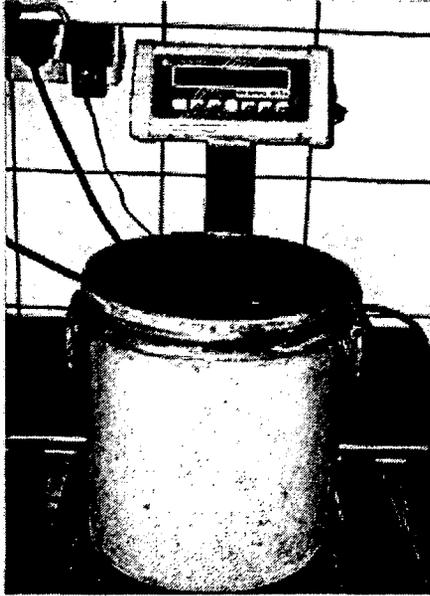


Figure 3-4: Mesure de la masse volumique du béton à l'état frais

3.3.2 Essais sur le béton à l'état durci

➤ Prélèvement des échantillons et mûrissement

Le prélèvement des échantillons a été effectué suivant la norme ASTM C192. Les cylindres de 100 mm x 200 mm sont remplis en deux couches de volume égal et pilonnées à 25 coups par couche en utilisant la tige en acier de diamètre 10 mm et dont l'extrémité est hémisphérique. Les échantillons sont bien arasés dans les cylindres, recouverts de plaques rigides pour éviter l'évaporation de l'eau puis entreposés à l'air sur une table pendant 24 heures \pm 2 heures. Des prismes et des plaques ayant des différentes dimensions sont également échantillonnés. Les échantillons sont démoulés puis mûris dans une chambre humide à une température de 23 ± 2 C° et une humidité relative de 100% jusqu'à l'échéance des essais.

➤ La résistance en compression

L'essai de la résistance en compression est effectué sur des cylindres de 100 mm x 200 mm conformément à la norme ASTM C39. La valeur de la résistance en compression à différents âges représente la moyenne de trois cylindres. Les cylindres sont bien surfacés pour assurer une distribution uniforme des contraintes sur la surface des cylindres. La capacité nominale de la presse est de 1112 KN. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est de 120 KN/minute.

➤ **La résistance en traction**

L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM C496 sur des cylindres de 100 mm x 200 mm. Les valeurs de la résistance en traction (MPa) à 28 et à 91 jours représentent la moyenne de trois cylindres. Une presse hydraulique d'une capacité maximale de 270 KN a été utilisée. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est de 1 MPa /minutes.

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est connu sous le nom de l'essai brésilien. La valeur finale de la résistance en traction qu'on obtient est calculée par la relation suivante :

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Ou T est la résistance en traction en (MPa), P est la charge de l'écrasement du cylindres en (N), L est la longueur du cylindre (mm) et d est le diamètre du cylindre en (mm).

La procédure utilisée pour réaliser cet essai est présentée dans la figure 3-5.

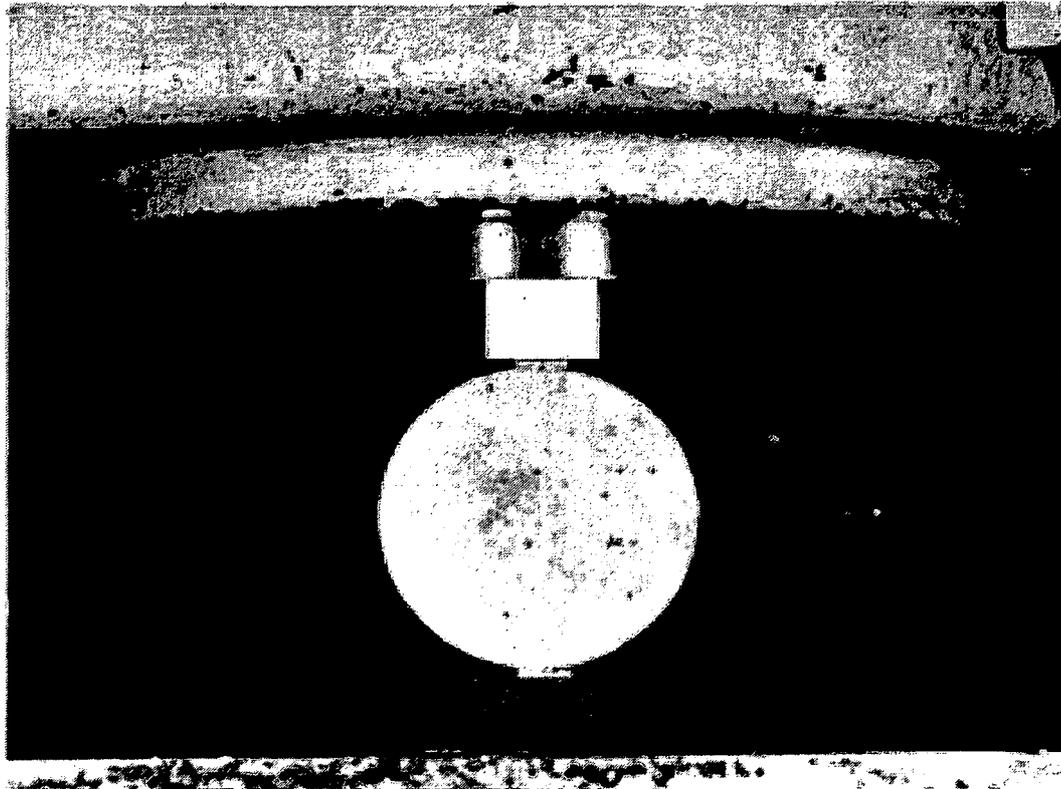


Figure 3-5: L'essai de la résistance en traction selon la norme ASTM C496

➤ La résistance en flexion

La résistance en flexion est déterminée selon les normes ASTM C78. Un prisme de 100 mm x 100mm x 400mm de béton est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge en deux points symétriques. Les points de l'application de la charge sont placés au tiers de la portée comme présentée dans la figure 3-6.

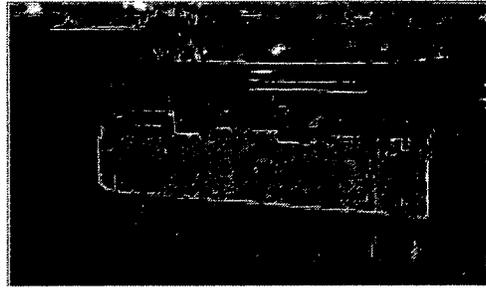


Figure 3-6: L'essai de la résistance en flexion selon la norme ASTM C78

Le taux de chargement appliqué est de 250 Ib/ 20 secondes. La contrainte théorique maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspond au module de rupture. La valeur finale de ce module représente la moyenne de trois poutres. Quand la rupture se passe au tiers central de la poutre , le module de rupture est calculé selon la relation suivante :

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Ou R est la valeur de module de rupture (MPa), P est la charge maximale indiquée par la machine en (N), L est la longueur de la poutre en (mm), b est la largeur de la poutre en (mm) et d est la profondeur de la poutre en (mm).

Par contre, si la rupture se passe en dehors du tiers central de la poutre, mais à une distance (a) de l'appui le plus proche inférieure à 5% de la longueur totale (L) de l'échantillon , le module de rupture est donné par la relation suivante :

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

➤ Le module d'élasticité

Cet essai est réalisé selon la norme ASTM C469 sur des cylindres 100 mm x 200 mm. Il consiste à déterminer le rapport contrainte – déformation longitudinal dans la région élastique de la courbe contrainte-déformation d'un béton. Le module d'élasticité (E) d'un béton peut s'exprimer comme suit :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Où σ_2 est la contrainte correspondante à 40% de la charge ultime;

σ_1 est la contrainte correspondante à la déformation longitudinale $\varepsilon_1 = 0,000050$

ε_2 est la déformation produite par la contrainte S_2 .

➤ Perméabilité aux ions chlores

Cet essai est considéré parmi les essais de durabilité le plus important en Amérique du Nord [Aitcin, 2001]. La pénétration des ions chlores cause des dégradations importantes dans le béton notamment la corrosion des barres d'armature. Si le béton est imperméable aux ions chlores, sa performance est élevée et sa durée de vie augmente. L'essai de la diffusion accélérée des ions chlores est effectué conformément à la norme ASTM C1202.

L'essai de la diffusion accélérée des ions chlores est effectué sur des cylindres ayant des dimensions de 100 mm x 200mm qui sont coupés en deux dont 50mm de haut et 50 mm de bas. On met les petits échantillons (100mm x 50mm) entre deux cellules, une cellule qui contient 3% de la solution Na Cl et l'autre avec 0.30 de la solution Na OH. Une charge totale de 60 volts est appliquée pendant 6 heures.

La résistance du béton contre la pénétration des ions chlores est estimée en mesurant la charge totale (en Coulomb) qui passe à travers l'échantillon du béton pendant 6 heures sous une tension électrique de 60 volts. La procédure de l'essai est présentée dans la figure 3-7.

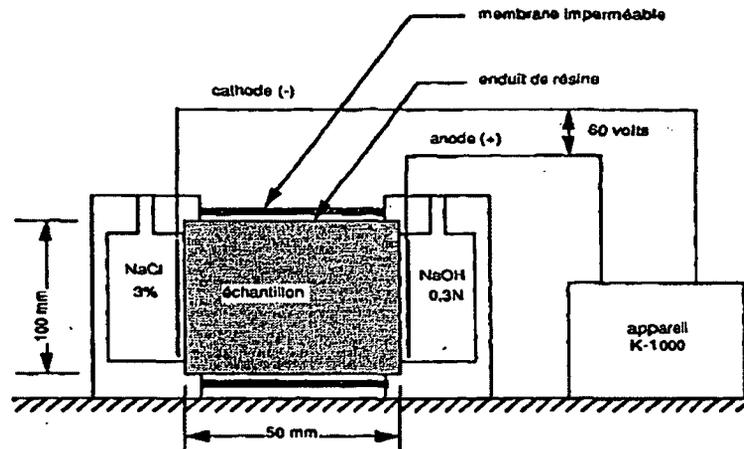


Figure 3-7: Principe de fonctionnement de l'appareil de la diffusion accéléré des ions chlores ASTM C1202

Le niveau de perméabilité peut être estimé en comparant la charge totale après 6 heures avec l'échelle de perméabilité proposée par Whiting. Ces valeurs s'appliquent à des bétons conservés 28 jours dans l'eau. (Tableau 3-8).

Tableau 3.8 : Les différents niveaux de perméabilité

Charge totale après 6 heures (Coulomb)	Niveau de perméabilité
Supérieure à 4000	Forte
Entre 2000-4000	Moyenne
Entre 1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
Inférieure à 1000	Négligeable

➤ Résistance au gel-dégel

L'essai de la résistance aux cycles de gel-dégel est effectué selon la norme ASTM C666. Deux éprouvettes de 75mm x 75mm x 355mm sont utilisées. Les cycles commencent après 14 jours de mûrissement humide. Les éprouvettes subissent entre 5 à 8 cycles par jour à température variable entre -18 C° et +4 C° pour chaque cycle. Le temps de passage d'une onde ultrasonore (en μ sec) d'une fréquence longitudinale, communément appelée pundit, perte de masse, les déformations longitudinales et le changement de longueur ont été mesurés chaque semaine. Ces mesures permettent de déterminer le

facteur de durabilité après 300 cycles de gel-dégel. Lorsque le facteur de durabilité dépasse 80% après 300 cycles de gel-dégel, le béton est considéré résistant au gel-dégel.

➤ Résistance à l'écaillage

L'essai de la résistance à l'écaillage est effectué selon la norme BNQ 2621-900. Il consiste à déterminer l'action du gel-dégel en regard de la résistance à l'écaillage du béton en contact avec des sels fondants. L'évaluation de la détérioration du béton se fait par la détermination de la masse des débris détachés de la surface du béton mis en contact avec une solution saline et soumis à des cycles journaliers de gel-dégel.

Après le démoulage des plaques de l'écaillage (255mm x 280mm x 75mm). Il faut les garder dans une chambre de mûrissement humide jusqu'à l'âge de 14 jours. Entre l'âge de 14 jours et 28 jours, il faut conserver les éprouvettes à l'air ambiant à une température entre 15 C° et 30 C° et à une humidité relative de 50% ± 20%. L'application de la solution saline (3% de Na Cl ± 0,10%) commence à partir de l'âge de 28 jours. La période de la re-saturation de l'éprouvette avec la solution saline à l'air ambiant est de 7 jours durant laquelle une couche de la solution saline de 5 mm ± 2 mm est maintenue sur la surface à évaluer. Il faut éviter toute évaporation de la solution saline en recouvrant la surface avec un matériau imperméable sans contact avec la solution saline.

Les cycles de gel-dégel doivent commencer lorsque les éprouvettes sont âgées de 35 jours. L'éprouvette est placée dans la chambre de gel-dégel et le cycle de gel-dégel a une période de 24 heures dont une période de gel de 16 hr ± 1 hr suivie par une période de dégel de 8 hr ± 1 hr. Ce cycle de gel-dégel se répète 56 fois sans interruption.

La masse des débris détachés est mesurée après 7 cycles, 21 cycles, 35 cycles et 56 cycles. La solution saline doit être renouvelée après chaque mesure sauf si la masse cumulative dépasse 1.50 kg/m². Le tableau 3-9 montre les caractéristiques de la surface écaillée selon la norme BNQ 2621-900.

Tableau 3.9: L'évaluation qualitative de l'essai de l'écaillage selon la norme BNQ 2621-900

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

➤ Réseau des bulles d'air dans le béton durci

Cet essai consiste à mesurer, à l'aide du microscope optique et à partir d'un réseau des lignes horizontales, les principales caractéristiques du réseau des bulles d'air entrainées dans le béton durci selon la norme ASTM C457. Les principales caractéristiques mesurées sont le facteur d'espacement L qui représente la demi-distance moyenne entre deux bulles d'air, la surface spécifique α des bulles d'air et le pourcentage de teneur en air du béton durci. Le facteur d'espacement est la caractéristique étroitement liée au diamètre des bulles d'air et contrôle la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel.

➤ Retrait de séchage

Cet essai sert à déterminer le changement de la longueur d'un échantillon du béton causé par le séchage. L'essai est effectué sur des échantillons de 75mm x 75mm x 285mm suivant la norme ASTM C157. Après démoulage à 24 heures, les échantillons sont directement immergés dans l'eau saturée à la chaux pendant 30 minutes puis ressortis pour les lectures initiales de longueur et ensuite les retourner à l'eau pour y séjourner pendant 27 jours. À l'âge de 28 jours, on fait sortir les poutres pour prendre une deuxième lecture et ensuite on les garde à l'air dans une chambre avec une température de $23 \pm 2 \text{ C}^\circ$ et une humidité relative de $50\% \pm 4\%$. Les lectures seront prises à l'âge de 4, 7, 14, 28 jours, 8, 16, 32 et 64 semaines depuis la conservation des poutres dans l'air.

Le changement de la longueur d'une poutre à un âge donné est calculé par la relation suivante:

$$\Delta L = \frac{CRD_x - \text{Initial CRD}}{G}$$

Ou ΔL : retrait (%);

CRD_x : Lecteur de comparateur à l'échéance x (mm);

Initial CRD : Lecteur de comparateur juste après le démoulage (mm);

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

La procédure utilisée pour mesurer le retrait de séchage est présentée dans la figure 3-8.

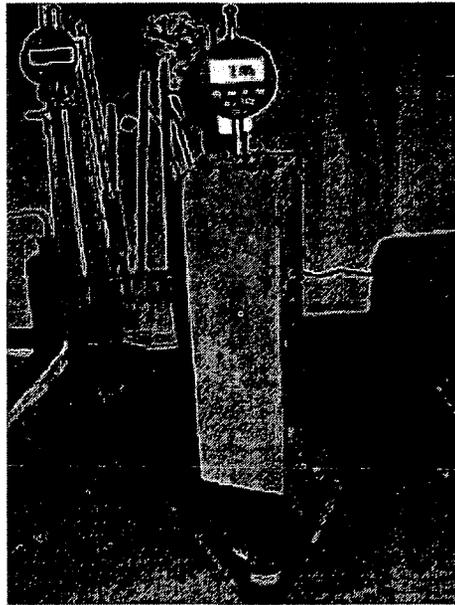


Figure 3-8: Mesure du retrait au séchage (ASTM C157)

Chapitre 4 – Matériaux utilisés

4.1 Les Granulats

Il est très important d'utiliser des granulats de type et de qualité appropriée parce que les granulats fins et gros occupent généralement de 60 à 75% du volume du béton soit 70 à 85% de sa masse. Les granulats influent fortement sur les propriétés, le dosage et le coût unitaire du béton tant à l'état plastique qu'à l'état durci. Les granulats fins sont généralement constitués de sable naturel ou de pierre concassée dont la plupart des particules sont plus petites que 5 mm. Par contre, les gros granulats se composent soit de gravier, soit de granulats concassés ou d'un mélange des deux ou prédominent les particules de plus de 5mm; les dimensions sont généralement comprises entre 10 et 40 mm.

4.1.1 Les granulats fins

Le sable utilisé dans cette étude est un sable siliceux en provenance de DJL (Demix), il a une densité à l'état SSS (saturé superficiellement sec) de 2,65, un taux d'absorption de 1,265% et un module de finesse de 2,54. Les caractéristiques granulaires et les limites exigées par la norme CSA A23.1-00 sont présentées dans le tableau 4-1.

La courbe granulométrique du sable utilisé dans ce projet est présentée dans la figure 4-1. Elle se trouve à l'intérieure des limites exigées par la norme CSA A23.1-00.

Tableau 4.1: Granulométrie des granulats fins

No. Tamis (mm)	% passé	Limites CSA
10	100	100
5	99	95-100
2.5	85	80-100
1.25	71	50-90
0.63	54	25-65
0.315	29	10-35
0.16	8	2-10
0.08	3	-

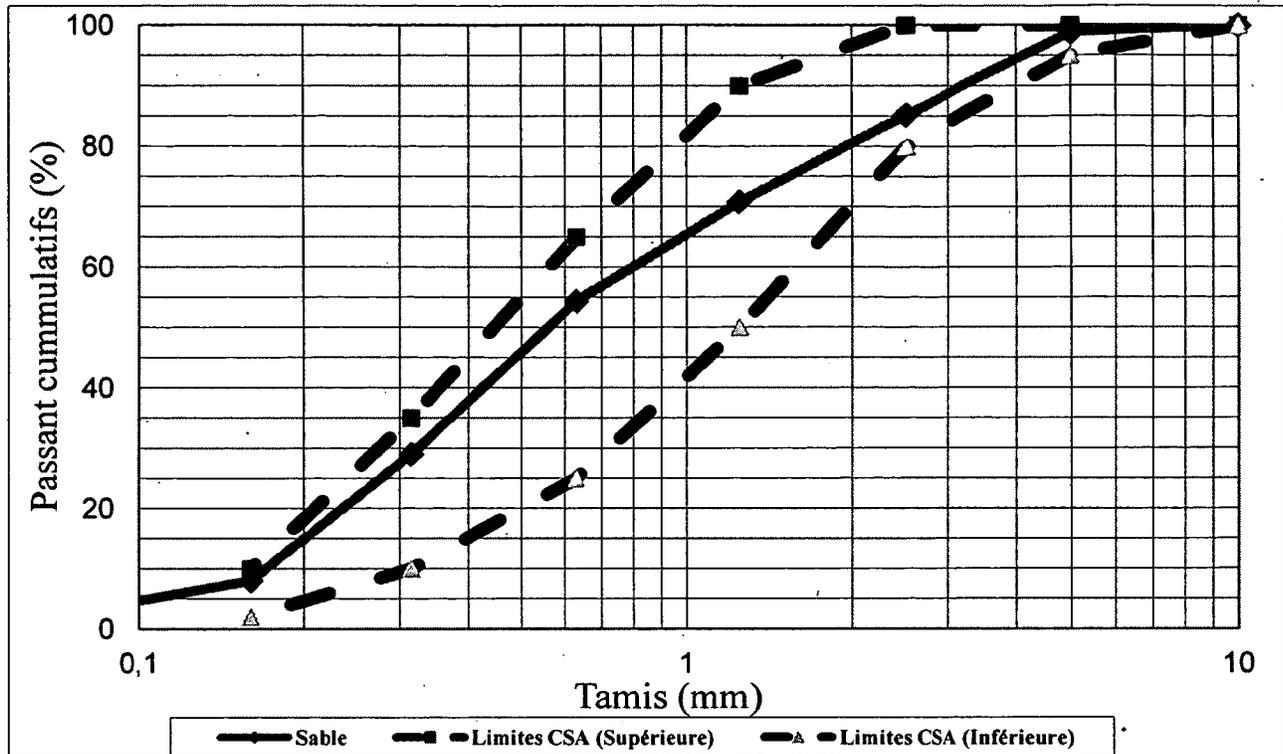


Figure 4-1: La courbe granulométrique du sable

4.1.2 Les gros granulats

Deux tailles différentes des gros granulats sont utilisées dans ce projet : des granulats ayant une taille de 5-14 mm et des granulats avec une taille de 20 mm. Une combinaison de 80% des granulats 5-14mm et 20% des granulats 20 mm est utilisée. Ce sont des granulats concassés en provenance de carrière St-Dominique au Québec.

Les gros granulats 5-14 mm ont une densité à l'état SSS de 2,71 et un taux d'absorption de 0,54%. Par ailleurs, les granulats 20 mm ont une densité à l'état SSS de 2,73 et un taux d'absorption de 0,34%. Les caractéristiques granulaires pour ces deux types de granulats sont présentées dans le tableau 4-2.

Tableau 4.2: La granulométrie des gros granulats

Granulats 5-14 mm		Granulats 20 mm
No. Tamis (mm)	Passant(%)	Passant (%)
40	100	100
28	100	100
20	100	90
14	87	8
10	50	0,7
5	8,7	0,3
2.5	4,3	0,3
1.25	2,9	-

La courbe granulométrique des granulats 5-14 mm et celui des granulats combinés sont respectivement présentés dans les figures 4-2 et 4-3.

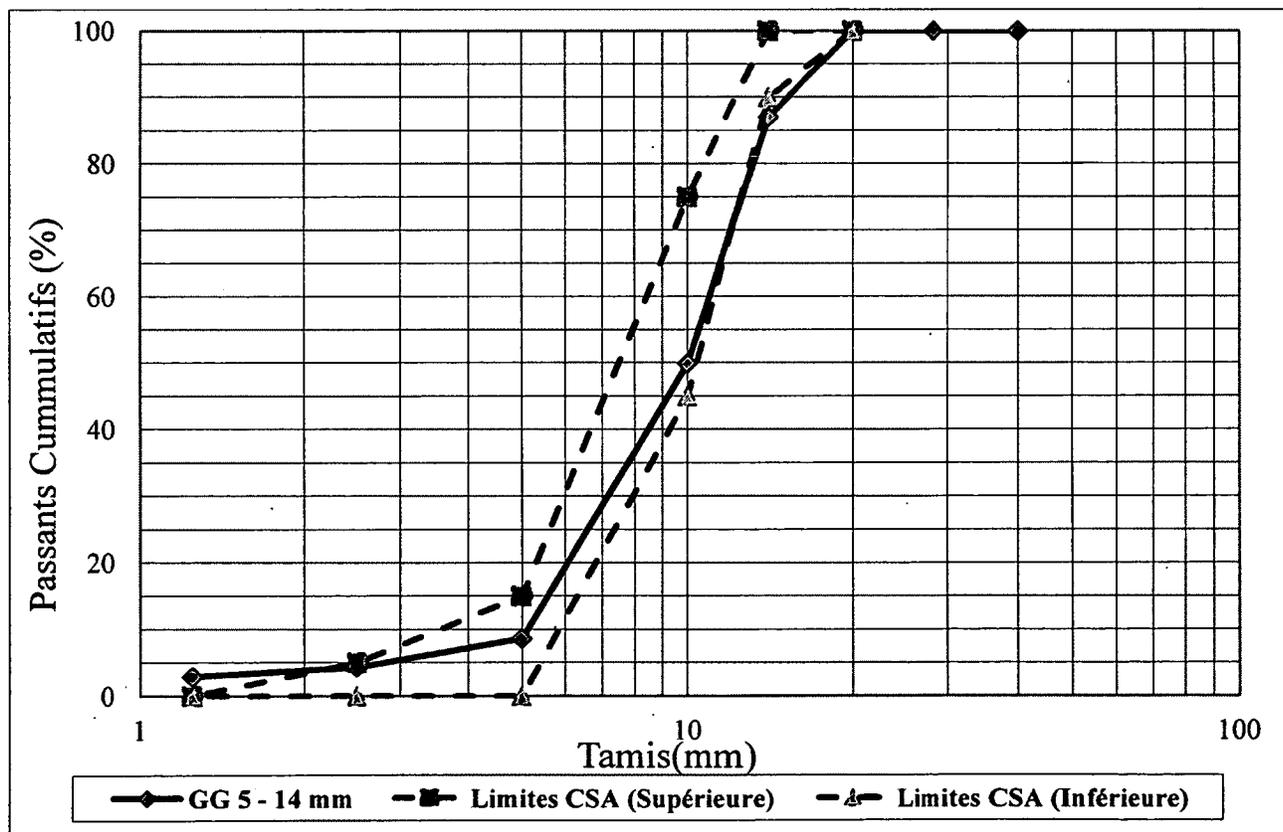


Figure 4-2: La courbe granulométrique des granulats 5-14 mm

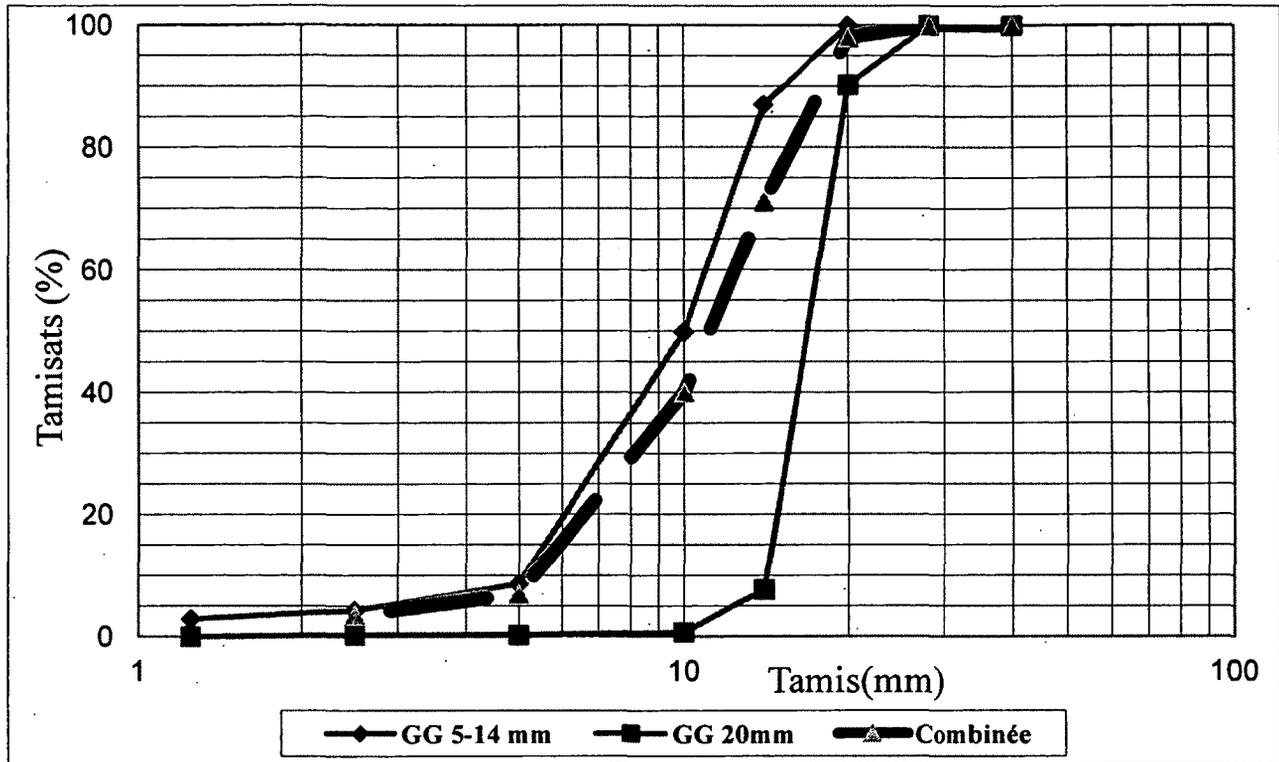


Figure 4-3: La courbe granulométrique combinée des gros granulats

4.2 L'eau de gâchage

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

4.3 Le ciment

Trois types différents de ciment sont utilisés dans cette étude. Un ciment de type (GU), un ciment ternaire (Tercem3000) composé de 22 % de laitier, 5% de fumée de silice et 73 % de ciment GU et un ciment ternaire (TerC³) composé de 20% des cendres volantes, 5% de fumée de silice et 75% de ciment GU. La densité du ciment GU est 3,15 et celles des ciments TerC³ et Tercem3000 sont respectivement de 2,91 et 3,05. La courbe granulométrique du ciment GU est présentée dans la figure 4-4. La taille moyenne des particules du ciment GU est 15 μ m. La composition chimique des ciments utilisés dans ce projet est présentée dans le tableau 4-3.

4.4 Les ajouts cimentaires

En plus du ciment portland, d'autres ajouts cimentaires tels que la fumée de silice et la poudre de verre sont utilisés.

4.4.1 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit industriel qui est le résultat de la fabrication du silicium et de différents ferrosiliciums. Les particules de fumée de silice ont un diamètre moyen inférieur à $0,10 \mu\text{m}$ soit 100 fois plus petit que les particules du ciment portland. Elles ont une couleur grise plus ou moins foncée dépendamment de leur teneur en carbone. La fumée de silice est une pouzzolane très réactive qui peut jouer aussi un rôle très important de filler à cause de son très faible diamètre [Aitcin, 2000]. La fumée de silice utilisée a une densité de 2,22 et une surface spécifique de $20000 \text{ m}^2 / \text{kg}$. Sa composition chimique est présentée dans le tableau 4-3.

4.4.2 La poudre de verre

Le verre mixte ne peut pas être recyclé facilement parce qu'il ne possède pas une valeur ajoutée. Alors, l'entreposage des bouteilles de verre mixte dans les municipalités provoque des effets néfastes sur l'environnement (voir son enfouissement). Alors, le broyage de ces bouteilles en poudre fine est une solution innovatrice du point de vue écologique. Cette poudre fine (la poudre de verre) est un matériau pouzzolanique qui peut remplacer une fraction du ciment portland dans le béton [Taha et al., 2008; Shayan et al., 2004; Shoa et al., 2000]. La poudre de verre est un matériau essentiellement siliceux avec plus 70% de SiO_2 qui est finement divisé. Elle ne possède pas des propriétés hydrauliques, mais elle contient des constituants (silice, alumine) capables à température ordinaire de fixer l'hydroxyde de calcium pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. Alors, la chaux libérée par l'hydratation des phases silicatées du béton réagit avec le verre pour donner un silicate de calcium hydraté semblable à celui formé lors de l'hydratation des deux phases silicatées du ciment portland [Taha et al., 2008; Shao et al., 2000].

La réaction pouzzolanique est présentée dans l'équation ci-dessous :

Pouzzolane + Portlandite \longrightarrow Silicate de calcium hydraté (C-S-H)

La poudre de verre utilisée provient des centres de tri. Elle a une densité de 2,54 et une surface spécifique de 440 m²/ kg. La courbe granulométrique de la poudre de verre est présentée dans la figure 4-5. La taille moyenne de ses particules est 12 μ m et leur taille maximale est 40 μ m.

La composition chimique de la poudre de verre est présentée dans le tableau 4-3.

4.5 Les adjuvants

La diminution du rapport E/L et l'utilisation de certains ajouts cimentaires affectent la maniabilité du béton. L'utilisation des agents réducteurs d'eau et des superplastifiants est alors essentielle pour compenser la perte de fluidité. La sévérité du climat oblige l'utilisation des agents entraîneur d'air pour rendre le béton plus résistant aux cycles de gel-dégel ainsi qu'aux sels de déglacage. L'entraînement de l'air dans le béton améliore sa mise en place et réduit sa ségrégation et son ressuage.

L'agent réducteur d'eau (ARE) utilisé est à base des acides hydroxycarboxyliques. Il a une densité relative de 1,15 et sa teneur en solide est 28,5%. Il satisfait aux exigences de la norme ASTM C494. Il est utilisé pour la réalisation des mélanges de la phase 2. Le superplastifiant utilisé est un polycarboxylate. Il a une densité relative de 1,07 et sa teneur en solide est 31%. Il satisfait les exigences de la norme ASTM C494. Finalement, l'agent entraîneur d'air (AEA) utilisé est une solution d'hydrocarbures et il répond aux exigences de la norme ASTM C260. Il a une densité de 1,007 et sa teneur en solide est de 5%.

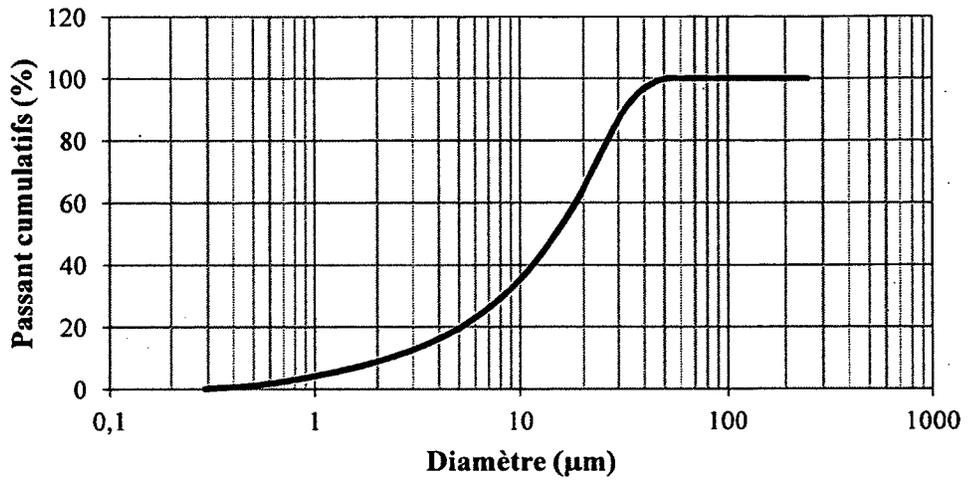


Figure 4-4: La courbe granulométrique de ciment GU

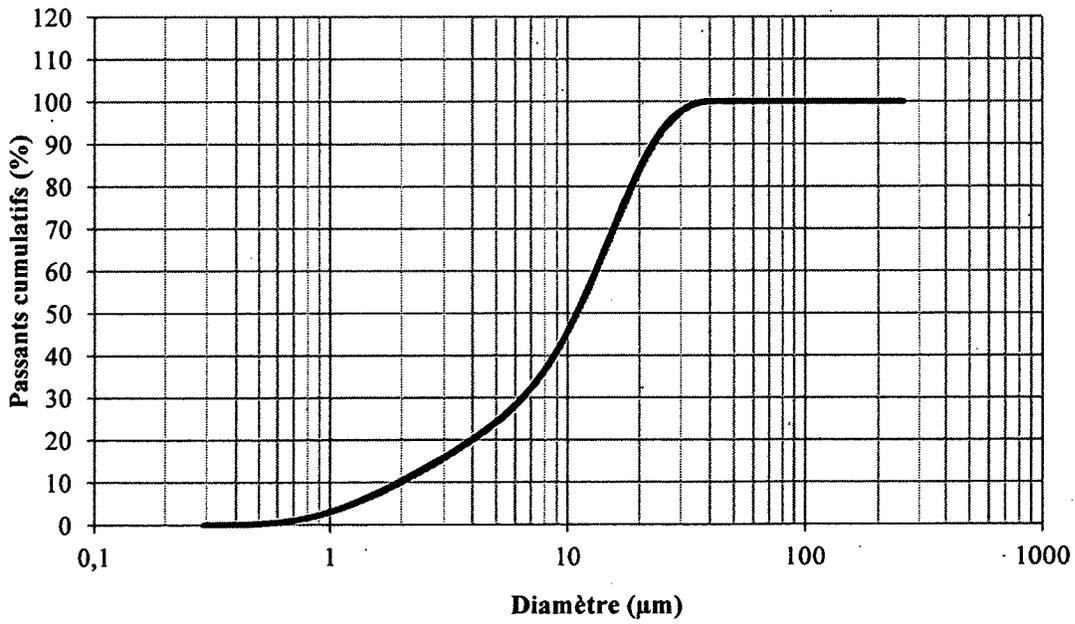


Figure 4-5: La courbe granulométrique de la poudre de verre

Tableau 4.3:La composition chimique des ciments et des ajouts utilisés dans ce projet

Identification	GU	TerC ³	Tercem3000	FS	PV
SiO ₂	20,43	28,95	25,56	94,19	74,47
Al ₂ O ₃	4,70	9,56	5,58	0,32	1,97
Fe ₂ O ₃	2,92	5,20	2,06	0,04	0,39
CaO	62,39	47,51	55,49	1,22	13,15
MgO	1,81	1,55	3,97	0,20	1,28
SO ₃	3,53	2,44	3,29	0,13	0,16
K ₂ O	0,95	1,17	0,77	0,68	0,64
Na ₂ O	0,18	0,00	0,17	0,00	7,26
Cl	0,07	0,02	0,00	0,03	0,04
TiO ₂	0,17	0,33	0,26	0,12	0,22
P ₂ O ₅	0,14	0,21	0,19	0,12	0,02
SrO	0,11	0,12	0,18	0,00	0,02
Mn ₂ O ₃	0,05	0,04	0,17	0,00	-0,04
Cr ₂ O ₃	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03
ZnO	0,03	0,02	0,02	0,04	0,00
Perte au feu	2,51	2,89	2,29	2,91	0,38
Na ₂ Oeq.	0,80	0,77	0,68	0,45	7,69

4.6 Composition du béton

La composition de 17 formulations du béton utilisées dans le plan factoriel est présentée dans les tableaux 4-4 et 4-5. Les formulations de 12 bétons utilisées pour la validation des modèles statistiques sont présentées dans les tableaux 4-6 et 4-7. La composition des bétons utilisés pour la réalisation de la phase 2 est présentée dans les tableaux 4-8 et 4-9.

Tableau 4.4: La formulation des mélanges des points factoriels

Mélange	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35	0,6	0,6	0,6	0,6
%PV	10	10	40	40	10	10	40	40
Liant (kg/m ³)	331	408	332	417	337	413	338	405
Ciment (kg/m ³)	298	367	199	250	303	372	203	243
PV (kg/m ³)	33	41	133	167	34	41	135	162
Eau (kg/m ³)	116	143	116	146	202	248	203	243
Sable (kg/m ³)	835	687	815	678	624	423	608	391
Granulats 5-14 mm (kg/m ³)	847	840	848	859	859	852	865	836
Granulats 20 mm (kg/m ³)	212	210	212	215	215	213	216	209
Dosage en SP (l/m ³)	3,808	2,552	3,505	2,265	0	0	0	0
Dosage en AEA (ml/m ³)	1180	489	1486	1313	144	144	145	143

Tableau 4.5: La formulation des mélanges des points centraux et points axiaux

Mélange	C1	C2	C3	A1	A2	A3	A4	A5	A6
E/L	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,265	0,685
%PV	25	25	25	25	25	0	50	25	25
Liant (kg/m ³)	373	372	373	304	449	367	364	375	384
Ciment (kg/m ³)	280	279	280	228	337	367	182	281	288
PV (kg/m ³)	93	93	93	76	112	0	182	94	96
Eau (kg/m ³)	177	177	177	144	213	174	173	99	263
Sable (kg/m ³)	637	631	632	773	503	643	602	873	438
Granulats 5-14 mm (kg/m ³)	853	848	850	845	870	837	831	1069	877
Granulats 20 mm (kg/m ³)	213	212	213	211	217	209	208	0	219
Dosage en SP (l/m ³)	0,9	0,9	0,9	1,5	0,5	1,2	0,5	18	0
Dosage en AEA (ml/m ³)	30	30	30	79	61	68	252	4492	123

Tableau 4.6: La formulation des mélanges de validation des modèles linéaires

Mélange	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
E/L	0,40	0,40	0,40	0,40	0,55	0,55	0,55	0,55
%PV	10	20	30	40	10	20	30	40
Liant (kg/m ³)	402	401	398	393	346	349	352	347
Ciment (kg/m ³)	362	321	279	236	311	279	246	208
PV (kg/m ³)	40	80	119	157	35	70	106	139
Eau (kg/m ³)	161	160	159	157	190	192	194	191
Sable (kg/m ³)	678	667	655	640	624	623	621	605
Granulats 5-14 mm (kg/m ³)	862	858	852	843	846	854	861	849
Granulats 20 mm (kg/m ³)	215	214	213	211	211	214	215	212
Dosage en SP (l/m ³)	1,869	1,749	1,664	1,616	0	0	0	0
Dosage en AEA (ml/m ³)	121	120	119	164	165	167	168	166

Tableau 4.7: La formulation des mélanges de validation des modèles quadratiques

Mélange	V9	V10	V11	V12
E/L	0,40	0,40	0,55	0,55
%PV	0	50	0	50
Liant (kg/m ³)	395	398	353	354
Ciment (kg/m ³)	395	199	353	177
PV (kg/m ³)	0	199	0	177
Eau (kg/m ³)	158	159	194	195
Sable (kg/m ³)	674	639	644	611
Granulats 5-14 mm (kg/m ³)	846	851	864	866
Granulats 20 mm (kg/m ³)	211	213	216	217
Dosage en SP (l/m ³)	2,002	1,58	0	0
Dosage en AEA (ml/m ³)	140	142	168	169

Tableau 4.8: La formulation des mélanges binaires de la Phase 2

Mélange	Témoin	15PV	20PV	25PV
E/L	0,45	0,45	0,45	0,45
%PV	0	15	20	25
Liant (kg/m ³)	368	380	374	364
Ciment (kg/m ³)	368	323	299	273
PV (kg/m ³)	0	57	75	91
Eau (kg/m ³)	166	171	168	164
Sable (kg/m ³)	679	696	681	659
Granulats 5-14 mm (kg/m ³)	841	867	852	830
Granulats 20 mm (kg/m ³)	210	217	213	207
Dosage en ARE (ml/m ³)	975	975	975	975
Dosage en AEA (ml/100 kg de liant)	43	51	62	78

Tableau 4.9: La formulation des mélanges ternaires de la phase 2

Mélange	Témoin	20PV+5FS	Tercem3000	TerC3
E/L	0,45	0,45	0,45	0,45
%PV	0	20	0	0
%FS	0	5	0	0
Liant (kg/m ³)	368	380	371	382
Ciment (kg/m ³)	368	285	371	382
PV (kg/m ³)	0	76	0	0
FS (kg/m ³)	0	19	0	0
Eau (kg/m ³)	166	171	167	172
Sable (kg/m ³)	679	686	680	685
Granulats 5-14 mm (kg/m ³)	841	867	846	871
Granulats 20 mm (kg/m ³)	210	217	211	218
Dosage en ARE (ml/m ³)	975	1105	1105	999
Dosage en AEA (ml/100 kg de liant)	43	76	63	96

Chapitre 5 - Résultats et Discussions

5.1 Phase 1 (Effet des paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton incorporant de la poudre de verre)

5.1.1 Résultats expérimentaux

Les propriétés à l'état frais pour les bétons confectionnés pour la réalisation du plan factoriel sont présentées dans les tableaux 5-1 et 5-2.

Tableau 5.1: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges des points factoriels

Mélange	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Affaissement (mm)	190	200	250	220	180	240	200	240
Air (%)	7,5	7,4	5,5	6,9	7,0	6,6	7,6	7,2
Masse Volumique (kg/m ³)	2345	2290	2325	2320	2240	2150	2230	2085

Tableau 5.2: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges des points centraux et des points axiaux

Mélange	C1	C2	C3	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Affaissement (mm)	200	210	210	190	210	215	185	230	220
Air (%)	6,8	7,4	7,4	7,2	6,0	8,5	8,2	4,9	7,6
Masse volumique (kg/m ³)	2255	2240	2245	2280	2255	2230	2180	2430	2180

Les propriétés à l'état frais pour les bétons de validation sont présentées aux tableaux 5-3 et 5-4.

Tableau 5.3: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges de validation des modèles linéaires

Mélange	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Affaissement (mm)	230	210	215	220	200	180	170	195
Air (%)	6,2	7,2	5,5	7,8	5,8	5,9	5,8	7,3
Masse Volumique (kg/m ³)	2320	2300	2330	2245	2280	2260	2280	2205

Tableau 5.4: Les propriétés à l'état frais pour les mélanges de validation des modèles quadratiques

Mélange	V9	V10	V11	V12
Affaissement (mm)	225	230	180	185
Air (%)	7,2	7,2	7,4	7,2
Masse volumique (kg/m ³)	2285	2260	2265	2190

Les résistances en compression des mélanges utilisés pour établir les modèles statistiques sont présentées dans le tableau 5-5 avec leurs valeurs de l'écart type.

Tableau 5.5: Résistance en compression pour les mélanges du plan factoriel

Mélange	Résistance en compression (MPa)					
	1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	180 jours	1 an
F1	26,3 (0,98)	44,1 (0,92)	58,1 (1,56)	71,6 (0,28)	74,5 (4,53)	75,9 (2,1)
F2	28,2 (1,39)	42,6 (1,08)	52,1 (2,17)	61,4 (0,35)	62,2 (1,7)	76,3*(3,72)
F3	14,7 (0,15)	29,8 (0,97)	41,1 (1,9)	57,4 (2,75)	59,9 (3,54)	66,6 (1,64)
F4	13,8 (0,42)	31 (2)	39,3 (0,71)	51,4 (3,36)	57,4 (6,93)	61,3*(4,69)
F5	8,5 (0,21)	18,8 (0)	24,3 (0)	31,3 (0,87)	35,5 (2,04)	37,8*(2,12)
F6	4,8 (0,38)	12,9 (0,89)	17,8 (0,66)	23 (1,11)	28,3 (2,38)	29,2 (0,92)
F7	3,5 (0,21)	9,9 (0)	15,3 (0,91)	23,7 (0,71)	30,2 (0,57)	30,6* (1,7)
F8	2,4 (0,15)	6,8 (0,78)	12,9 (0,32)	19,2 (0,86)	24,2 (0,71)	25,7 (1,46)
C1	9,5 (0,65)	23,2 (1,6)	31,2 (0,56)	44,7 (0,72)	48,6 (0,42)	49,6 (2,10)
C2	9,7 (0,64)	19,1 (0,85)	29,8 (0,14)	38,6 (1,4)	42,8 (0,32)	46,2 (2,47)
C3	8,3 (0,25)	19,8 (1,54)	29,1 (1,15)	39,2 (1,2)	40,8 (2,4)	55,4 (2,17)
A1	11,9 (0,31)	22,8 (0,25)	35,6 (1,7)	38 (0,7)	46,8 (2,01)	46,6 (2,12)
A2	9,9 (0,61)	20,7 (1,34)	30,2 (0,71)	40,8 (1,48)	47,6 (1,61)	50,7 (5)
A3	14,8 (0,21)	24,6 (0,56)	38,7 (2,19)	39,9 (1,72)	46 (0,4)	46,8 (4,17)
A4	4,6 (0,12)	11,8 (0,4)	21 (0,1)	33,3 (1,77)	35,5 (1,82)	35,9 (2)
A5	29,8 (0)	42 (1,48)	55,4 (1,63)	59,2 (7,28)	67,3 (2,47)	75,4 (2,9)
A6	4,3 (0,12)	12,6 (1,18)	19,5 (0,85)	25 (0,2)	30,6 (1,5)	33,4 (0,27)

* : nouvelles gâchées faites avec le même ciment pour mesurer la résistance en compression à 1 an.

() : Écart-Type

Les valeurs de la perméabilité aux ions chlores sont présentées au tableau 5-6.

Tableau 5.6: La perméabilité aux ions chlores pour les mélanges du plan factoriel

Mélange	Perméabilité aux ions chlores (Coulombs)				
	28 jours	56 jours	91 jours	180 jours	1 an
F1	1941	1629	897	500	513
F2	2937	1715*	1220	690	430*
F3	1746	800	595	408	347
F4	1374	500*	458	332	337*
F5	5323	3286*	2059	1168	952*
F6	7476	5609	2107	1706	1212
F7	2785	1133*	792	644	509*
F8	2532	1095	949	756	696
C1	3217	1183	891	532	391
C2	3258	1222	879	642	371
C3	3114	1189	761	498	363
A1	2672	1134	695	443	356
A2	3483	1276	779	550	393
A3	4064	3533	3362	2565	2133
A4	1895	784	523	531	401
A5	1272	447	341	186	146
A6	6406	1275	1058	636	609

* : nouvelles gâchées faites avec le même ciment pour mesurer les perméabilités à 56 jours et 1 an.

5.1.2 Présentation des modèles statistiques

Les modèles linéaires établis pour la résistance en compression à 7, 91, 180 jours et 1 an sont présentés dans le tableau 5- 7. Par ailleurs, les modèles quadratiques de la résistance en compression à 1 et 28 jours sont présentés dans le tableau 5-8.

Tableau 5.7 : Les modèles linéaires de la résistance en compression

Résistance en compression (MPa)												
Modèle	1/√ 7 jours			91 jours			180 jours			1 an		
R ²	0,984			0,987			0,968			0,969		
Paramètre	Effet	F	Prob > F	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F
Intercepte	0,23			41,95			45,85			50,09		
E/L	0,068	226,1	< 0,0001	-18,07	416,33	< 0,0001	-16,98	193,94	< 0,0001	-19,41	202,04	< 0,0001
%PV	0,032	48,72	0,0009	-4,44	25,18	0,0024	-3,6	8,72	0,0213	-4,57	11,2	0,0123
Liant	0,014	9,9	0,0255	-3,63	16,81	0,0064	-3,5	8,24	0,0239	-2,49	3,34	0,1105
E/L*%PV	0,017	13,9	0,0136	1,59	3,24	0,122	NS	NS	NS	NS	NS	NS
E/L*Liant	0,015	10,35	0,0235	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
%PV*Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Paramètre non-significatif

Tableau 5.8: Les modèles quadratiques de la résistance en compression

Résistance en compression (MPa)						
Model	1 jour			28 jours		
R ²	0,99			0,971		
Paramètre	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F
Intercepte	9,34			30,6		
E/L	-7,76	628,73	< 0,0001	-13,24	296,92	< 0,0001
%PV	-3,76	147,49	< 0,0001	-5,37	48,94	< 0,0001
Liant	-0,57	3,35	0,1003	-1,89	6,07	0,0314
E/L*%PV	2,43	36,02	0,0002	1,98	3,89	0,0744
E/L*Liant	-0,64	2,5	0,148	NS	NS	NS
%PV*Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS
(E/L) ²	2,72	69,98	< 0,0001	2,27	8,33	0,0148
(%PV) ²	NS	NS	NS	NS	NS	NS
(Liant) ²	0,56	2,97	0,1189	NS	NS	NS

Les modèles établis sont valides pour une large gamme de proportions des mélanges avec un rapport E/L variant de 0,35 à 0,60, un pourcentage de la poudre de verre de 10% à 40% et un dosage en liant de 335 kg/m³ à 415 kg/m³.

D'après les modèles statistiques présentés dans le tableau 5-7, l'effet des paramètres étudiés sur les résistances en compression à 7 jours, 91 jours, 180 jours et 1 an est linéaire. Les probabilités inférieures à 10% indiquent que les paramètres étudiés ont un effet significatif sur la réponse étudiée. Une probabilité inférieure à 10% indique qu'il y a moins de 10% de chance qu'un tel paramètre n'a pas d'effet significatif sur la réponse. Les coefficients de corrélation (R^2) des modèles proposés pour les résistances en compression à 7 jours, 91 jours, 180 jours et 1 an sont respectivement de 0,984, 0,987, 0,968 et 0,969. Une valeur de R^2 supérieure à 0,90 indique une bonne corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour les modèles statistiques.

Les modèles présentés dans le tableau 5-7 indiquent que le rapport E/L a l'effet le plus important sur les résistances en compression. Tel que prévu, le rapport E/L a un effet négatif sur la résistance en compression à tous les âges ce qui indique qu'une augmentation de celui-ci entraîne une diminution de la résistance en compression quelque soit l'âge du béton. Le taux d'incorporation de la poudre de verre (%PV) a également un effet important, mais moins que celui de rapport E/L. Une augmentation de taux de remplacement du ciment par la poudre de verre provoque une diminution de la résistance en compression. Par exemple, dans le cas de la résistance en compression à 91 jours, l'effet de rapport E/L est 4 fois plus important que l'effet du pourcentage de la poudre de verre sur la diminution de la résistance en compression à 91 jours. Cependant, à l'âge de 7 jours, l'effet de rapport E/L est 2 fois plus que l'effet de taux d'incorporation de la poudre de verre sur la réduction de la résistance en compression à 7 jours.

Pour le modèle de la résistance en compression à 91 jours, le pourcentage de la poudre de verre (%PV) a un effet légèrement supérieur à celui du dosage en liant. Les deux paramètres ont un effet négatif sur le développement de la résistance en compression à cet âge. Une augmentation du dosage en liant provoque une diminution de la résistance à 91 jours, mais elle reste beaucoup moins importante que celle causée par l'augmentation de rapport E/L. L'interaction entre le rapport E/L et %PV a aussi un effet significatif sur la résistance à 91 jours, mais elle est moins importante que celui du dosage en liant.

Pour les modèles de la résistance en compression à 180 jours et à 1 an, l'effet de %PV est légèrement supérieur à celui de dosage en liant. Les deux facteurs ont des effets négatifs sur le développement de la résistance en compression à 180 jours et 1 an. À l'âge de 180 jours et 1 an, l'interaction entre les facteurs étudiés n'a pas eu d'effet sur la réponse finale.

Les modèles quadratiques de la résistance en compression à 1 jour et à 28 jours sont présentés dans le tableau 5-8. Tous les paramètres significatifs dans les deux modèles ont une probabilité inférieure à 10% à l'exception de l'interaction (E/L * liant) et l'effet quadratique du (liant) ² dans le modèle de la résistance à 1 jour qui ont respectivement des probabilités de 14% et 11%. Les coefficients de corrélation des modèles proposés pour la résistance en compression à 1 jour et à 28 jours sont respectivement de 0,99 et 0,971 ce qui indique une excellente corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour les modèles statistiques établis. Les deux modèles sont valides pour une large gamme de mélanges avec un rapport E/L variant de 0,265 à 0,685, un pourcentage de la poudre de verre de 0% à 50% et un dosage en liant de 308 kg/m³ à 442 kg/m³.

Le rapport E/L est le paramètre le plus significatif sur le développement de la résistance en compression à 1 et à 28 jours. Il a un effet négatif, une augmentation du rapport E/L entraîne une diminution de la résistance en compression. Le taux d'incorporation de la poudre de verre (%PV) a aussi un effet important, mais moins que celui du rapport E/L. Une augmentation de taux de remplacement du ciment par la poudre de verre provoque une diminution de la résistance en compression à 1 et à 28 jours. Par exemple, à l'âge de 28 jours, l'effet négatif de la poudre de verre est 2,5 fois moins élevé que l'effet de rapport E/L sur la réduction de la résistance en compression à 28 jours. Cependant, à l'âge de 1 an, l'effet de la poudre de verre est 4 fois moins que celui de rapport E/L sur la réduction de la résistance en compression à 1 an.

Dans le cas du modèle de la résistance en compression à 1 jour; tous les paramètres ont un effet significatif à l'exception de l'interaction (PV*liant) et (PV) ². L'interaction (E/L * %PV) a un effet positif plus important que l'effet négatif de dosage en liant. Cependant, cet effet reste inférieur à l'effet négatif de %PV sur le développement de la résistance à 1 jour.

Pour le modèle de la résistance en compression à 28 jours, l'interaction (E/L * %PV) et le dosage en liant ont un effet quasi similaire sur cette réponse, mais ils restent largement inférieur que celui de %PV.

Le paramètre $(E/L)^2$ a un effet positif sur la résistance à 28 jours et il a un effet plus important que celui de l'interaction $(E/L*\%PV)$ mais il reste inférieur à celui de $\%PV$.

Alors, la poudre de verre montre une réduction de la résistance en compression à jeune âge qu'à moyen et à long terme. Cependant, cette réduction de la résistance en compression à jeune âge par rapport au béton du témoin peut être récompensée par la réduction du rapport E/L .

Tableau 5.9: Les modèles linéaires de la perméabilité aux ions chlores

Perméabilité aux ions chlores (Coulombs)						
Modèle	28 jours			1/√ 56 jours		
R ²	0,995			0,983		
Paramètre	Effet	F	Prob> F	Effet	F value	Prob> F
Intercepte	3245,91			0,028		
E/L	1264,75	328,05	< 0,0001	-0,0048	91,2	< 0,0001
%PV	-1154,8	273,47	< 0,0001	0,0075	226,4	< 0,0001
Liant	315,5	20,41	0,0107	NS	NS	NS
E/L*%PV	-715,25	104,92	0,0005	NS	NS	NS
E/L*Liant	159,5	5,22	0,0844	-0,0015	9,47	0,0217
%PV*Liant	-472	45,69	0,0025	0,0018	13,27	0,0108

Tableau 5.10: Les modèles quadratiques de la perméabilité aux ions chlores

Perméabilité aux ions chlores (Coulombs)									
Model	√ 91 jours			Ln (180 jours)			Ln (1 an)		
R ²	0,942			0,925			0,904		
Paramètre	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F
intercepte	27,63			6,3			5,93		
E/L	4,63	38,68	< 0,0001	0,37	53,01	< 0,0001	0,38	1,95	< 0,0001
%PV	-8,00	115,43	< 0,0001	-0,37	51,4	< 0,0001	-0,34	1,57	0,0003
Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
E/L*%PV	-1,65	2,89	0,115	NS	NS	NS	NS	NS	NS
E/L*Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
%PV*Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
$(E/L)^2$	NS	NS	NS	-0,13	6,05	0,03	NS	NS	NS
$(\%PV)^2$	4,75	38,87	< 0,0001	0,3	29,89	0,0001	0,36	1,68	0,0001
$(Liant)^2$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Les modèles linéaires décrivant la variation de la perméabilité aux ions chlorés à 28 et à 56 jours sont présentés dans le tableau 5-9. Tous les paramètres significatifs dans les deux modèles possèdent des probabilités inférieures à 10%. Les coefficients de corrélation proposés pour la perméabilité aux ions chlorés à 28 et à 56 jours sont respectivement de 0,995 et 0,983.

Pour le modèle de la perméabilité aux ions chlorés à 28 jours; tous les paramètres ont un effet significatif. Le rapport E/L a l'effet le plus important sur la perméabilité aux ions chlorés à 28 jours. Puisqu'il est présenté dans le modèle par un signe positif, une augmentation de sa valeur provoque une augmentation de la perméabilité à 28 jours. Le taux d'incorporation de la poudre de verre a un effet important sur la perméabilité, mais il reste légèrement inférieur à celui du rapport E/L. Une augmentation de taux de remplacement du ciment par la poudre de verre entraîne une diminution de la perméabilité à 28 jours. L'effet des interactions (E/L*%PV) et (%PV*liant) sont plus importants que l'effet de dosage en liant. Une augmentation de la valeur de ces interactions diminue la perméabilité à 28 jours. L'interaction (E/L * liant) a l'effet le plus faible sur l'augmentation de la perméabilité à 28 jours.

Pour le modèle de la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours, le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre a l'effet le plus important. Une augmentation de celui-ci cause une diminution de la pénétrabilité à 56 jours. Cet effet du pourcentage de la poudre de verre sur la perméabilité à 56 jours peut être expliqué par l'augmentation de la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre à l'âge de 56 jours. Le rapport E/L a aussi un effet important sur la perméabilité mesurée à cet âge, mais son effet reste légèrement inférieur à celui de la poudre de verre. Les interactions (E/L*liant) et (%PV*liant) ont un effet quasi similaire sur la perméabilité à 56 jours. Une augmentation de la valeur de l'interaction (E/L*liant) provoque une augmentation de la pénétrabilité à 56 jours. Par contre, une augmentation de l'interaction (%PV*Liant) entraîne une diminution de celle-ci.

Les modèles quadratiques de la perméabilité aux ions chlorés à 91, à 180 jours et à 1 an sont présentés dans le tableau 5-10. Tous les paramètres significatifs dans les deux modèles possèdent des probabilités inférieures à 10% à l'exception de l'interaction (E/L*%PV) dans le modèle de 91 jours qui a une probabilité de 11%. Les coefficients de corrélation (R^2) pour les perméabilités à 91 et 180 jours ainsi qu'à 1 an sont respectivement de 0,942, 0,925 et 0,904 ce qui indique une excellente corrélation.

Pour le modèle de la perméabilité aux ions chlorés à 91 jours, le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre a l'effet le plus important sur la réduction de la perméabilité à 91 jours. Le rapport E/L a

aussi un effet important sur la perméabilité à 91 jours, mais il est 2 fois inférieures que l'effet négatif de la poudre de verre. Une augmentation de rapport E/L entraîne une diminution de la résistance contre la pénétration des ions chlorures à 91 jours. L'effet quadratique de $(\%PV)^2$ est similaire à celui de rapport E/L, il est présenté par un signe positif ce qui indique qu'une augmentation importante de taux de remplacement du ciment par le verre entraîne une légère augmentation de la pénétrabilité à l'âge de 91 jours. L'augmentation de la valeur de l'interaction $(E/L * \%PV)$ entraîne une légère diminution de la perméabilité à 91 jours.

Pour le modèle de la perméabilité aux ions chlorures à 180 jours, le rapport E/L et le taux d'incorporation de la poudre de verre ont un effet similaire mais opposé sur la perméabilité à cet âge. L'effet quadratique de $(\%PV)^2$ est légèrement inférieur à celui du rapport E/L. L'effet quadratique de $(E/L)^2$ est le plus faible sur la réduction de la pénétrabilité à 180 jours. Pour le modèle de la perméabilité aux ions chlorures à 1 an, le rapport (E/L) et le $(\%PV)^2$ ont un effet légèrement supérieur à celui de la poudre de verre.

Alors, l'incorporation de la poudre de verre dans le béton engendre une réduction importante de la perméabilité aux ions chlorures à 28, 56, 91 et 180 jours ainsi qu'à 1 an par rapport au béton du témoin.

Tableau 5.11: Les modèles linéaires du coût unitaire du béton

Model	Prix (50 CAD/t)			Ln (Prix (100 CAD/t))			√Prix (150 CAD/t)		
R²	0.956			0.966			0.956		
Paramètre	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F
intercepte	78.36			4.4			9.33		
E/L	-14.5	123.23	< 0.0001	-0.17	149.55	< 0.0001	-0.78	145.17	< 0.0001
%PV	-6.75	26.7	0.0013	-0.048	11.54	0.0145	NS	NS	NS
Liant	NS	NS	NS	0.026	3.28	0.1199	0.14	4.45	0.0728
E/L*%PV	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
E/L*Liant	2.25	2.97	0.1286	0.031	4.63	0.0749	0.12	3.68	0.0966
%PV*Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tableau 5.12: Les modèles linéaires du coût unitaire du béton

Model	√Prix (200 CAD/t)			√Prix (250 CAD/t)		
R²	0.947			0.961		
Paramètre	Effet	F	Prob> F	Effet	F	Prob> F
intercepte	9.58			9.81		
E/L	-0.75	115.88	< 0.0001	-0.73	125.18	< 0.0001
%PV	NS	NS	NS	0.23	12.96	0.0114
Liant	0.15	4.74	0.066	0.18	7.55	0.0334
E/L*%PV	NS	NS	NS	NS	NS	NS
E/L*Liant	0.13	3.38	0.1085	0.12	3.47	0.1118
%PV*Liant	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Les modèles de coût unitaire du béton pour différents prix unitaires de la poudre de verre sont présentés par des modèles linéaires dans les tableaux 5-11 et 5-12. Les coefficients de corrélation pour les modèles (50 CAD/t), (100 CAD/t), (150 CAD/t), (200 CAD/t) et (250 CAD/t) sont respectivement de 0,956, 0,966, 0, 956, 0,947 et 0,961 ce qui indique une bonne corrélation.

Le rapport E/L est le paramètre le plus important sur tous les modèles établis; une diminution du rapport E/L provoque une augmentation du coût unitaire du béton quelque soit le prix unitaire de la poudre de verre. Le taux d'incorporation de la poudre de verre (%PV) est un paramètre significatif dans les

modèles de (50 CAD/t) (100 CAD/t) et (250 CAD/t), seulement. Par contre, il n'a aucun effet significatif sur les modèles de (150 CAD/t) et (200 CAD/t) parce que son prix selon les deux modèles est quasi identique avec celui du ciment portland. L'interaction (E/L*liant) a un effet significatif dans tous les modèles de prix, mais son effet est beaucoup moins important que celui de rapport E/L.

5.1.3 Validation des modèles statistiques

Deux différents types du béton sont utilisés pour la validation des modèles proposés. Un béton ordinaire avec un rapport E/L de 0,55 et un béton à haute performance avec un rapport E/L de 0,40. La composition des mélanges de validation est présentée dans la section 4.6.

D'autres formulations supplémentaires réalisées dans le cadre d'une autre étude réalisée à l'UdeS par [Zidol, 2010] sont aussi considérées pour la validation des certains modèles développés dans cette étude. Ces mélanges sont formulés avec les mêmes matériaux utilisés dans cette étude. Ils sont présentés dans le tableau 5-13. Ces bétons sont formulés avec cinq différents rapports E/L avec des taux de remplacement du ciment par la poudre de verre de 20% et 30%. Les proportions de ces mélanges se situent à l'intérieur du domaine expérimental correspondant au plan factoriel réalisé dans cette étude.

Tableau 5.13: Les mélanges de validation [Zidol, 2010]

Mélange	Valeurs absolues			Valeurs codées		
	E/L	%PV	Liant(kg/m ³)	E/L	%PV	Liant(kg/m ³)
Z1	0,35	20	415	-1	- 0,333	+ 1
Z2	0,35	30	415	-1	+ 0,333	+ 1
Z3	0,40	20	400	-0,60	- 0,333	+ 0,625
Z4	0,40	30	400	-0,60	+ 0,333	+ 0,625
Z5	0,45	20	375	-0,20	- 0,333	0
Z6	0,45	30	375	-0,20	+ 0,333	0
Z7	0,48	20	365	+0,04	- 0,333	-0,25
Z8	0,48	30	365	+0,04	+ 0,333	-0,25
Z9	0,55	20	350	+0,60	- 0,333	-0,625
Z10	0,55	30	350	+0,60	+ 0,333	-0,625

Les résistances en compression à 91 jours et 1 an et la perméabilité aux ions chlores à 28 et 56 jours sont modélisées par des modèles linéaires. Alors, ces modèles sont validés par 18 mélanges dont; les 8 bétons

de validation des modèles linéaires et les 10 mélanges réalisés par [Zidol, 2010]. Par ailleurs, les résistances en compression à 1 et 28 jours et la perméabilité à 91 jours sont modélisés par des modèles quadratiques. Ces bétons sont validés par les 12 bétons de validation des modèles quadratiques et les 10 mélanges réalisés par [Zidol, 2010]. Les valeurs mesurées et prédites pour les mélanges de validation des modèles de la résistance en compression et de la perméabilité sont respectivement présentées dans les tableaux 5-14 et 5-15.

Tableau 5.14: Valeurs mesurées et prédites pour les mélanges de validation des modèles de résistance en compression

Mélange	Résistance en compression (MPa)								
	1 jour		28 jours		91 jours		1 an		
	Mesurée	Prédite	Mesurée	Prédite	Mesurée	Prédite	Mesurée	Prédite	
N (Nombre de mélanges) = 22	V1	21	20,30	39,6	44,75	48,65	55,95	60*	64,75
	V2	18	16,80	37,15	40,35	40,65	52,35	52,6*	61,70
	V3	16,35	13,35	34,8	36	46	48,75	60,7*	58,65
	V4	9,9	9,85	26,1	31,65	45,2	45,10	52,1*	55,61
	V5	9,2	8,85	26,65	28,85	29,9	36,85	35*	44,60
	V6	8,1	7,30	25,45	26,05	26,45	34,55	36,2*	41,50
	V7	6,5	5,75	24,9	23,3	28,5	32,20	38,45*	38,50
	V8	3,5	4,20	15,65	20,5	21,7	29,90	33,6*	35,45
	V9	26,3	23,90	44,4	49,2	-	-	-	-
	V10	7,5	6,25	29	27,2	-	-	-	-
	V11	8,35	10,4	26	31,7	-	-	-	-
	V12	2,5	2,60	13,8	17,65	-	-	-	-
	Z1	26,8	22,55	54,9	46,70	62,3	58,40	73,30	68,55
	Z2	19	18,40	45,4	41,80	55,3	54,40	68,80	65,50
	Z3	21,5	16,80	43,7	40,35	54,7	52,35	66,00	61,70
	Z4	16,8	13,35	39,4	36,00	52,6	48,75	57,00	58,65
	Z5	11,4	12,40	40,9	35,25	49,2	47,15	62,30	55,50
	Z6	8,9	9,6	34,7	31,40	44,8	44	53,50	52,45
	Z7	12,1	10,45	33,7	32,30	44,4	43,60	46,40	51,45
	Z8	8,3	8,00	30,1	28,80	40,7	40,70	41,10	48,40
Z9	6,4	7,3	21,4	26,05	29,3	34,55	31,30	41,50	
Z10	6,8	5,75	23,7	23,25	34,8	32,20	38,00	38,50	

* : nouvelles gâchées faites avec le même ciment pour mesurer la résistance en compression à 1 an.

Tableau 5.15: Valeurs mesurées et prédites pour les mélanges de validation des modèles de perméabilité

	Mélange	Perméabilité aux ions chlores (Coulombs)					
		28 jours		56 jours		91 jours	
		Mesurée	Prédite	Mesurée	Prédite	Mesurée	Prédite
N (Nombre de mélanges) = 22	V1	2767	3645	2388*	1929	1492	1340
	V2	2676	2964	1398*	1226	738	768
	V3	1976	2285	848*	848	514	531
	V4	1442	1604	721*	621	462	510
	V5	4972	5037	3652*	2683	2215	1949
	V6	3270	4177	1735*	1799	932	1151
	V7	2616	3319	1123*	1290	757	781
	V8	2403	2459	1071*	970	685	685
	V9	-	-	-	-	2046	2504
	V10	-	-	-	-	351	701
	V11	-	-	-	-	3202	3471
	V12	-	-	-	-	680	824
	Z1	1919	2441	1047	1027	546	657
	Z2	1916	1834	710	714	418	458
	Z3	2870	2964	1168	1226	611	768
	Z4	1796	2285	728	848	426	531
	Z5	2738	3330	1192	1430	666	887
	Z6	2199	2656	944	1010	579	609
	Z7	3070	3571	1308	1543	802	963
	Z8	2967	2861	762	1098	533	658
Z9	3293	4177	1253	1799	830	1151	
Z10	3886	3319	809	1290	673	781	

* : nouvelles gâchées faites avec le même ciment pour mesurer la perméabilité à 56 jours

Les tableaux 5-16 et 5-17 montrent les réponses de trois mélanges centraux, l'erreur estimée et l'erreur relative à un niveau de confiance de 90%. Les erreurs relatives expérimentales pour la résistance en compression à 28 jours, les perméabilités à 28,56 jours et 1 an sont situées entre 3 % et 6,40 %. Par contre, les erreurs relatives expérimentales pour les résistances en compression à 1, 7, 91,180 jours et 1 an et pour les perméabilités à 91 jours et 1 an se situent entre 13 % et 18 %. Tandis que pour la

perméabilité à 180 jours, elle est de 22,8 %. Une différence importante entre les valeurs mesurées de la perméabilité à 180 jours pour les points centraux a été observée. Elle peut être à des problèmes de mesure au laboratoire.

Tableau 5.16: La fiabilité des résultats de la résistance en compression

	Résistance en compression (MPa)					
	1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	180 jours	1 an
Moyenne (N=3)	9,13	20,7	30,03	40,82	44,07	50,4
Écart-type	0,729	2,19	1,069	3,37	4,068	4,69
Erreur standard	0,42	1,26	0,617	1,946	2,35	2,71
Erreur estimée à 90% de confiance	1,23	3,68	1,81	5,68	6,86	7,91
Erreur relative à 90% de confiance	13,5%	17,8%	6,0%	13,9%	15,6%	15,7%

Tableau 5.17: La fiabilité des résultats de la perméabilité

	Perméabilité aux ions chlorés (Coulombs)				
	28 jours	56 jours	91 jours	180 jours	1 an
Moyenne (N=3)	3196	1198	844	557	375
Écart-type	74,19	21	71,84	75,27	14,42
Erreur standard	42,83	12,12	41,47	43,46	8,08
Erreur estimée à 90% de confiance	125	35	121	127	24
Erreur relative à 90% de confiance	3,9%	3,0%	14,3%	22,8%	6,4%

➤ **Validation de la résistance en compression à 1 jour (MPa)**

La relation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour la résistance en compression à 1 jour est présentée dans la figure 5-1. Les erreurs estimées correspondant à un niveau de confiance de 90% sont aussi présentées. Le rapport entre les valeurs prédites et mesurées pour les 22 mélanges de validation est de 0,901 ce qui indique que le modèle de la résistance en compression à 1 jour est fiable. La majorité de valeurs prédites pour les mélanges de validation se situent à l'intérieur de l'erreur estimée (1,23 MPa). Ce modèle peut être employé pour prédire les valeurs des différents mélanges formulés avec un rapport E/L de 0,265 à 0,685, un taux d'incorporation de la poudre de verre de 0% à 50% et un dosage en liant de 308 kg/m³ à 442 kg/m³.

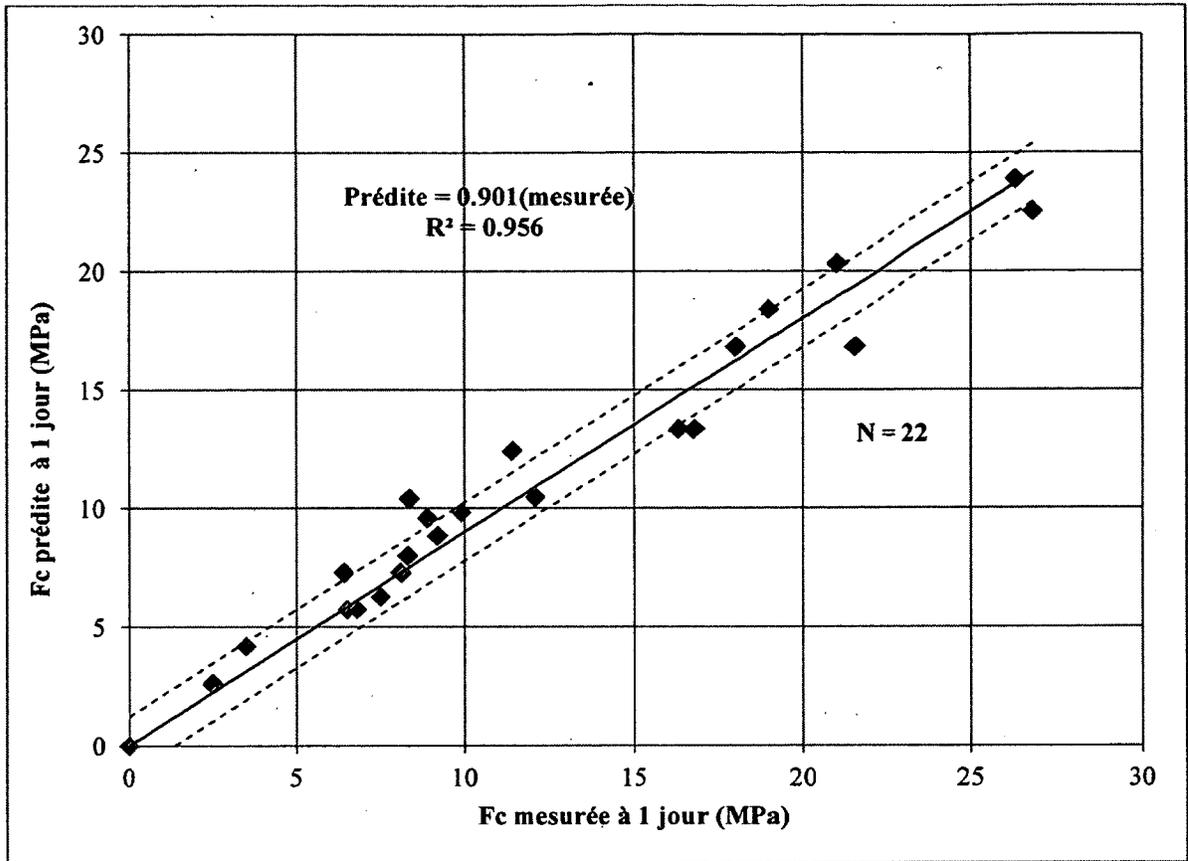


Figure 5-1: Validation de la résistance en compression à 1 jour

➤ **Validation de la résistance en compression à 28 jours (MPa)**

La relation entre les valeurs mesurées et prédites pour la résistance en compression à 28 jours est présentée dans la figure 5-2. Les erreurs estimées correspondant à un niveau de confiance de 90% sont aussi présentées. Le rapport entre les valeurs prédites et mesurées pour les 22 mélanges de validation est 0,989 ce qui indique que le modèle de la résistance en compression à 28 jours ait une précision élevée. Quelques points de validation se trouvent à l'extérieur du domaine de l'erreur estimée (1,81 MPa). Il peut être expliqué par la différence significative entre les résistances mesurées et prédites à 28 jours pour les faibles rapports E/L (0,35 et 0,40). Mais, cette différence n'empêche pas d'avoir un bon facteur de corrélation entre les résistances prédites et mesurées à 28 jours. Donc, ce modèle statistique peut être utilisé pour prédire les valeurs de la résistance en compression à 28 jours pour des mélanges formulés

avec un rapport E/L de 0,265 à 0,685, un pourcentage de la poudre de verre entre 0% et 50% et un dosage en liant de 308 kg/m³ à 442 kg/m³.

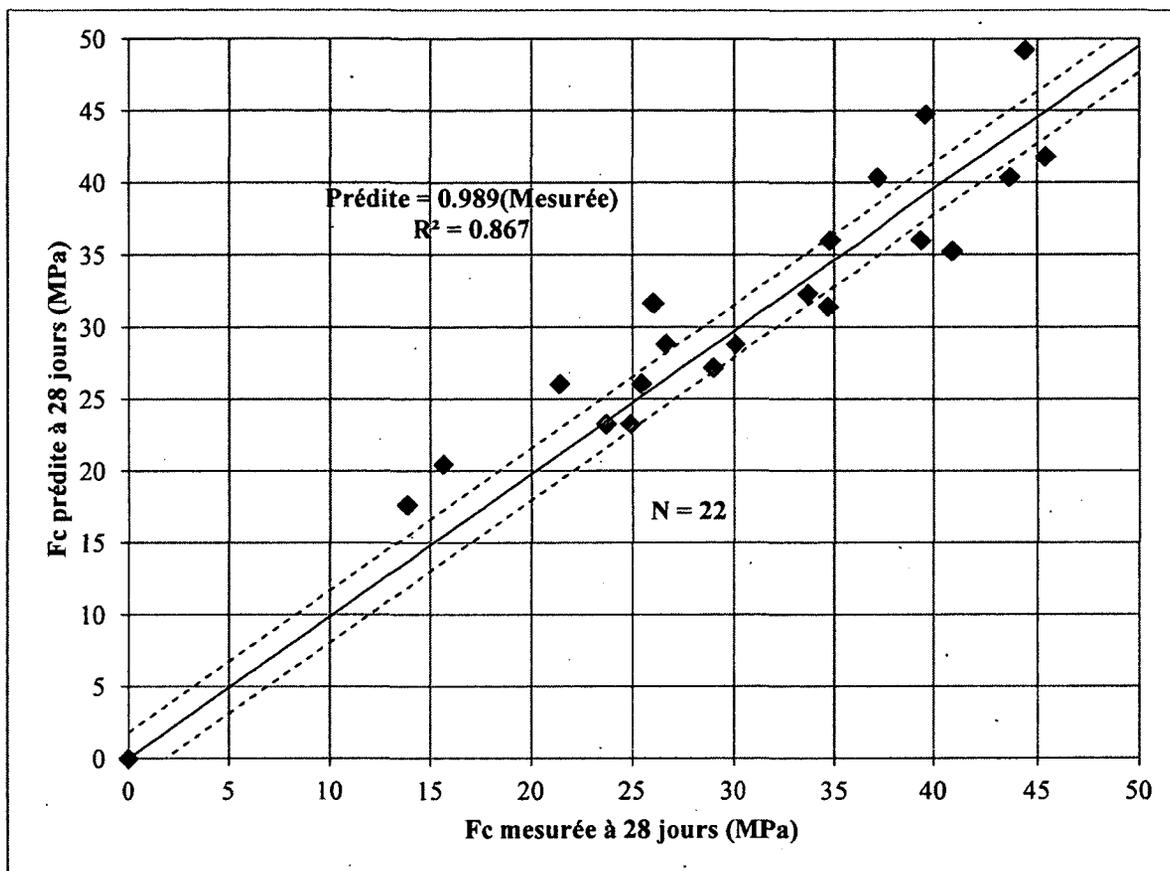


Figure 5-2: Validation de la résistance en compression à 28 jours

➤ **Validation de la résistance en compression à 91 jours (MPa)**

Les valeurs prédites et mesurées pour les 18 mélanges de validation de la résistance en compression à 91 jours sont présentées dans la figure 5-3. Les erreurs estimées correspondant à un niveau de confiance de 90% sont aussi présentées. Le rapport entre les valeurs prédites et celles mesurées est 1,027 ce qui montre la fiabilité et l'exactitude de modèle pour estimer les résistances en compression à 91 jours. La majorité des valeurs prédites se trouve à l'intérieur de l'erreur estimée (5,68 MPa). Cependant, la différence est significative entre les valeurs mesurées et prédites pour la résistance à 91 jours pour 4 mélanges de validation. Le mélange de validation (V2) engendre la différence la plus importante entre les résistances en compression prédites et mesurées à 91 jours. La différence peut être expliquée par des

problèmes de mesure au laboratoire pour le mélange (V2) à 91 jours. Les problèmes de mesure peuvent être liés à un taux de chargement différent que ceux utilisés pour les autres bétons lorsque l'essai de la résistance en compression a été effectué. Le facteur de corrélation (R^2) entre les valeurs prédites et mesurées pour la résistance en compression à 91 jours est bon (0,86). Ce modèle peut être employé pour une large gamme de formulation des mélanges avec un rapport E/L de 0,35 à 0,60, un taux d'incorporation de la poudre de verre de 10% à 40% et un dosage en liant de 335 kg/m³ à 415 kg/m³.

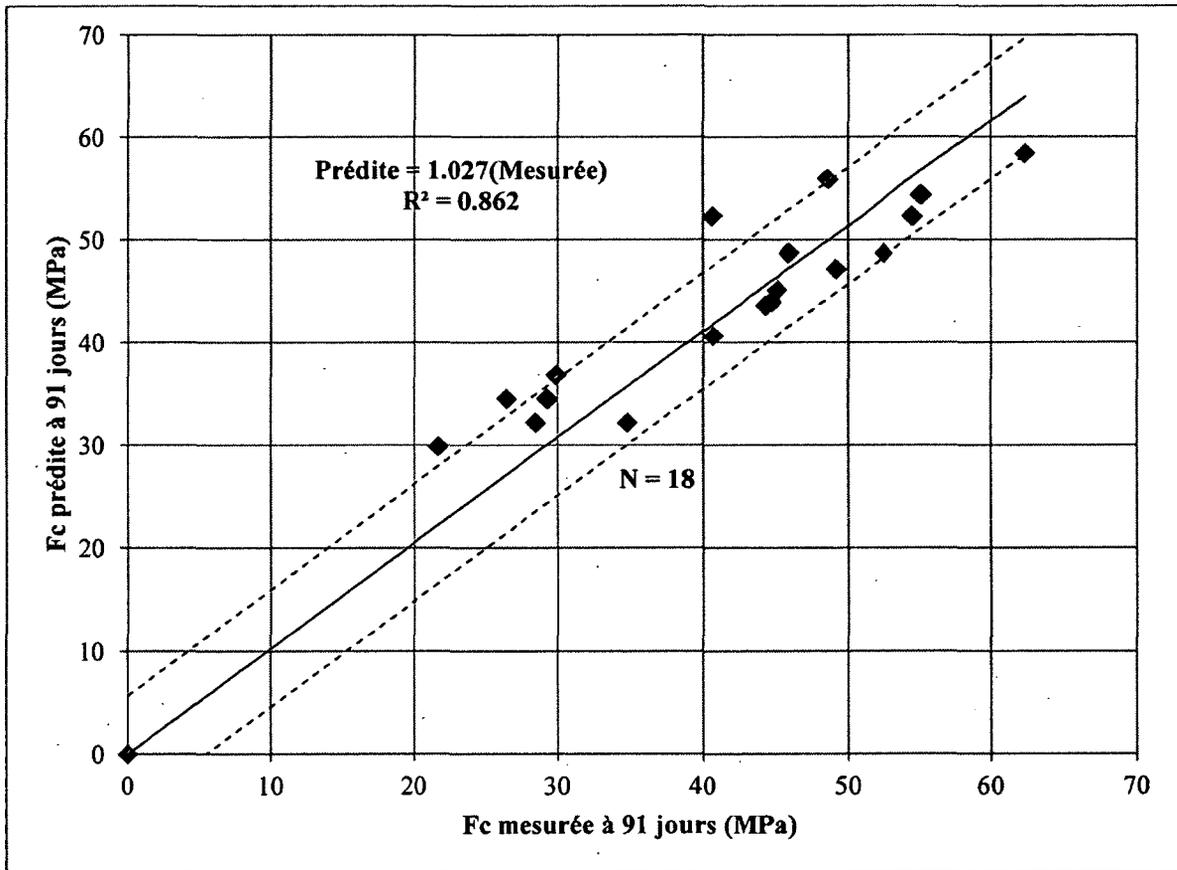


Figure 5-3: Validation de la résistance en compression à 91 jours

➤ **Validation de la résistance en compression à 1 an (MPa)**

Les valeurs prédites et mesurées pour les 18 mélanges de validation de la résistance en compression à 1 an sont présentées dans la figure 5-4. Les erreurs estimées correspondant à un niveau de confiance de 90% sont aussi présentées. Toutes les valeurs prédites se situent à l'intérieur de l'erreur expérimentale

(7,91 MPa). Alors, le facteur de corrélation (R^2) entre les valeurs mesurées et prédites pour la résistance en compression à 1 an est bon. Le rapport entre les valeurs prédites et mesurées est 1,021 ce qui indique une bonne précision de ce modèle pour la prédiction de la résistance en compression à 1 an. Ce modèle peut être utilisé pour un rapport E/L de 0,35 à 0,60, un pourcentage de la poudre de verre de 10% à 40% et un dosage en liant de 335 kg/m³ à 415 kg/m³.

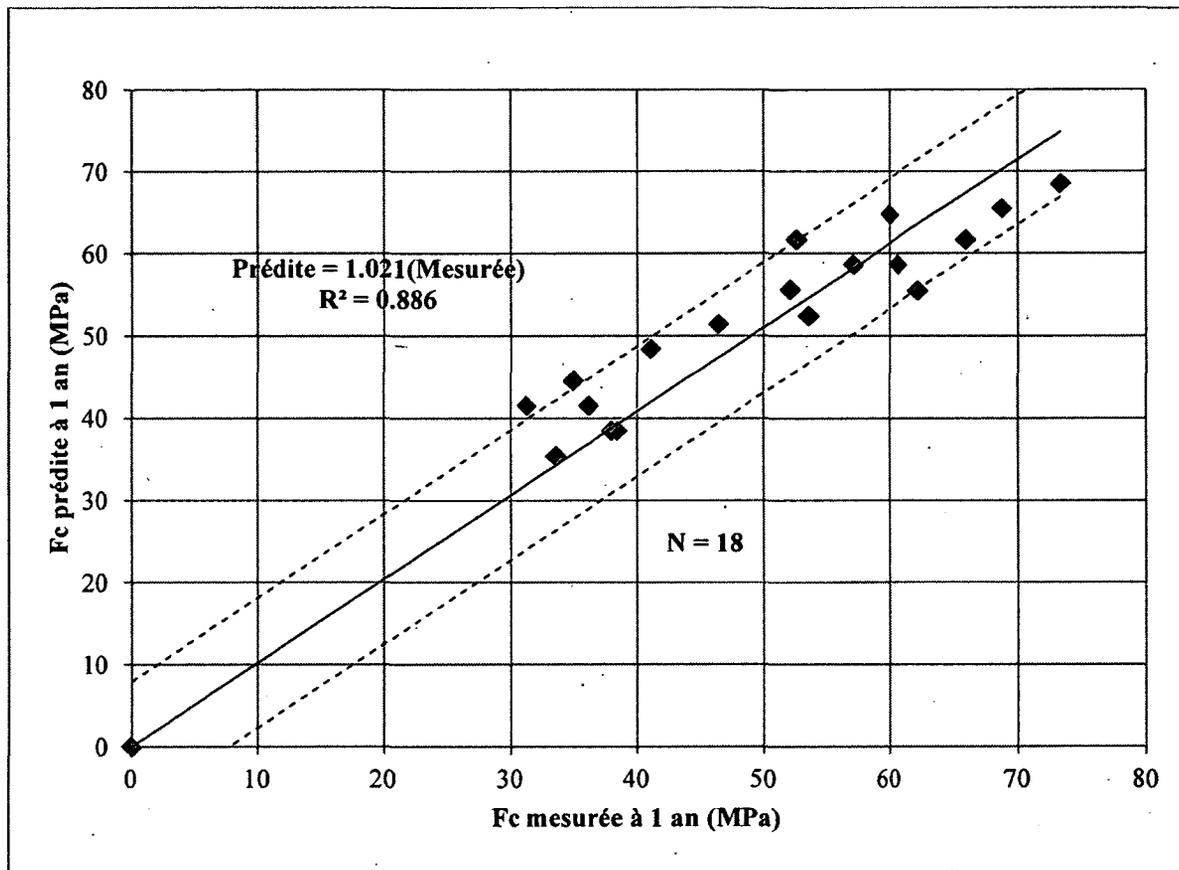


Figure 5-4: Validation de la résistance en compression à 1 an

➤ **Validation de la perméabilité aux ions chlorés à 28 jours (Coulombs)**

La relation entre les valeurs mesurées et celles prédites pour la perméabilité aux ions chlorés à 28 jours est présentée dans la figure 5-5. Les erreurs estimées à un niveau de confiance de 90% sont aussi présentées. Certains points de validation se trouvent à l'extérieur de l'erreur estimée à 28 jours (125 Coulombs). La différence entre les valeurs prédites et mesurées de la perméabilité à 28 jours est plus importante dans le cas des bétons proportionnés avec des rapports E/L élevés (0,48 et 0,55). Cela

peut être expliqué par la perméabilité élevée à 28 jours pour les bétons formulés avec des rapports E/L élevés. Alors, ce modèle surestime la valeur de la perméabilité aux ions chlores à 28 jours pour certains bétons étudiés. Le rapport entre les valeurs prédites et celles mesurées est 1,11 ce qui indique que le modèle soit fiable. Ce modèle est applicable pour des mélanges proportionnés avec un rapport E/L de 0,35 à 0,60, un pourcentage de la poudre de verre de 10% à 40% et un dosage en liant de 335 kg/m³ à 415 kg/m³.

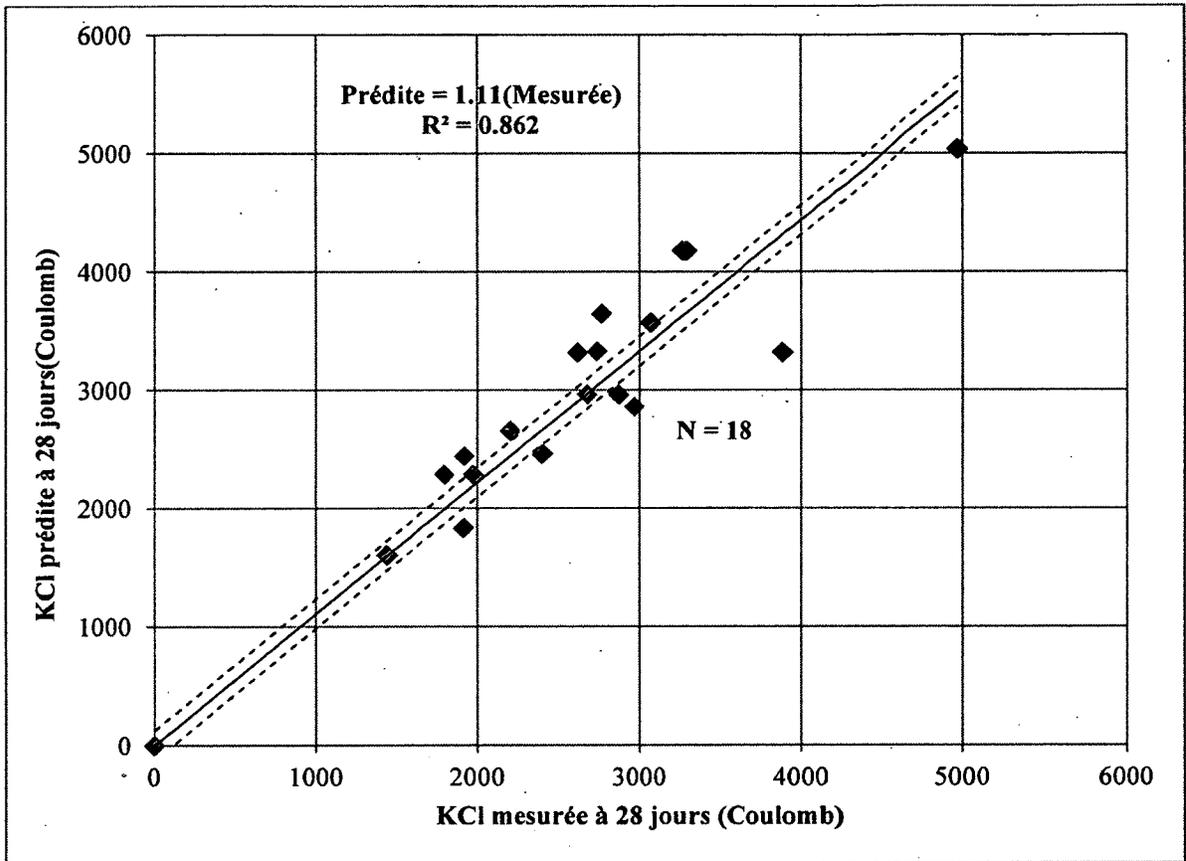


Figure 5-5: Validation de la perméabilité aux ions chlores à 28 jours

➤ **Validation de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours (Coulombs)**

La relation entre les valeurs mesurées et celles prédites pour la perméabilité aux ions chlores à 56 jours est présentée dans la figure 5-6. Les erreurs estimées à un niveau de confiance de 90% sont aussi présentées. La plupart des points de validation se trouvent à l'extérieur de l'erreur estimée à 56 jours (35 Coulombs). Elle peut être traduite par la faible valeur de l'erreur estimée à ce niveau de confiance

(90%). La faible valeur de l'erreur estimée est liée à la similarité de la valeur de la perméabilité mesurée au laboratoire à l'âge de 56 jours pour les trois bétons (C1, C2, C3) qui sont représentés par les trois points centraux dans le plan d'expérience. La différence entre les perméabilités mesurées et prédites à 56 jours est plus importante dans le cas des mélanges V1, V5 et Z9 à cause de leur perméabilité élevée à 56 jours. Le facteur de corrélation (R^2) entre les valeurs prédites et mesurées n'est pas bon. Cependant, le rapport entre les valeurs prédites et celles mesurées est 0,93 ce qui indique que ce modèle soit fiable pour estimer la perméabilité aux ions chlores à 56 jours pour des formulations des bétons avec un rapport E/L de 0,35 à 0,60, un pourcentage de la poudre de verre de 10% à 40% et un dosage en liant de 335 kg/m³ à 415 kg/m³.

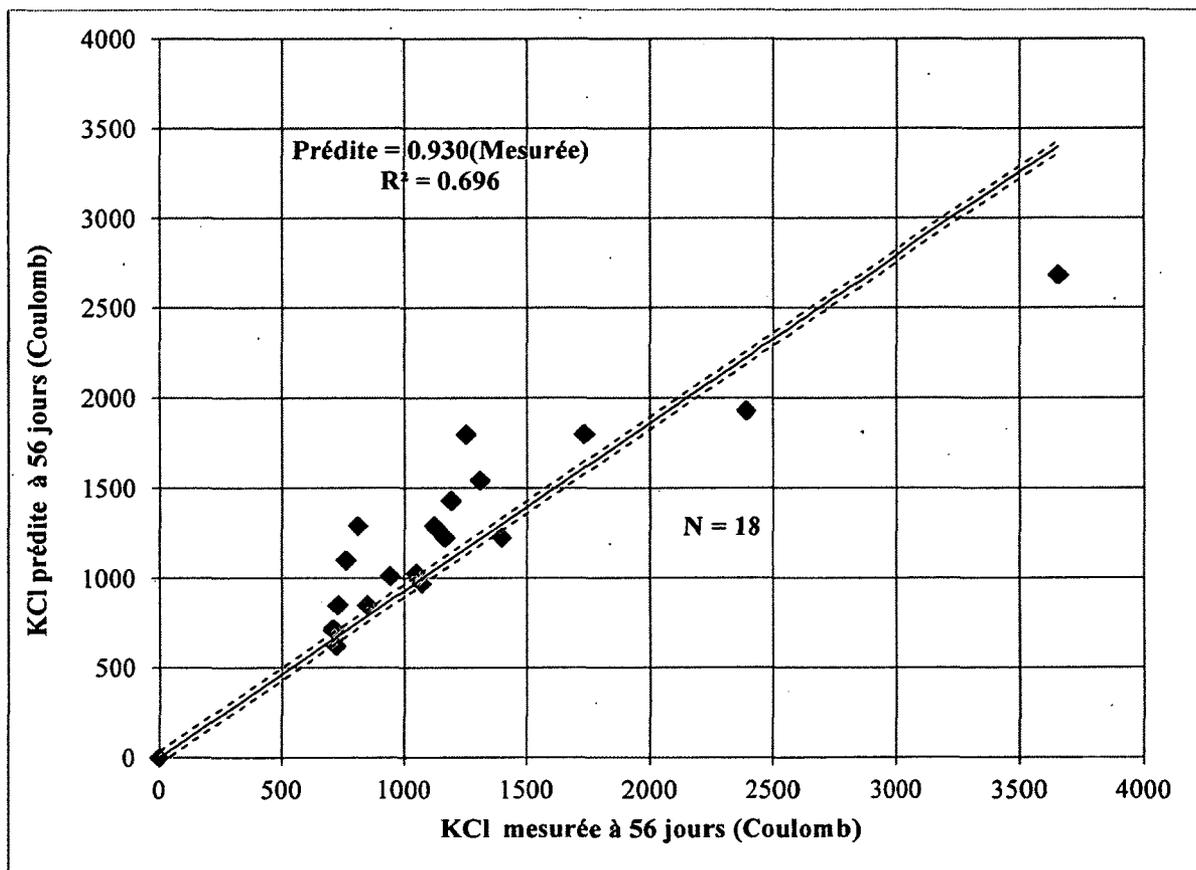


Figure 5-6: Validation de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours

➤ Validation de la perméabilité aux ions chlores à 91 jours (Coulombs)

La relation entre les valeurs prédites et celles mesurées pour la perméabilité aux ions chlores à 91 jours est présentée dans la figure 5-7. L'erreur estimée à un niveau de confiance de 90% est aussi présentée. La majorité des valeurs se trouvent à l'intérieur de l'erreur estimée (121 Coulombs) ce qui montre une excellente corrélation (R^2) entre les valeurs prédites et mesurées à 91 jours. Le rapport entre les valeurs prédites et celles mesurées est 1,08 ce qui montre la fiabilité de ce modèle pour estimer les valeurs de la perméabilité à 91 jours. Ce modèle peut être employé pour une large gamme des proportions des mélanges avec un rapport E/L de 0,265 à 0,685, un pourcentage de la poudre de verre de 0% à 50% et un dosage en liant de 308 kg/m³ à 442 kg/m³.

La validation pour les autres modèles est présentée dans l'annexe 1.

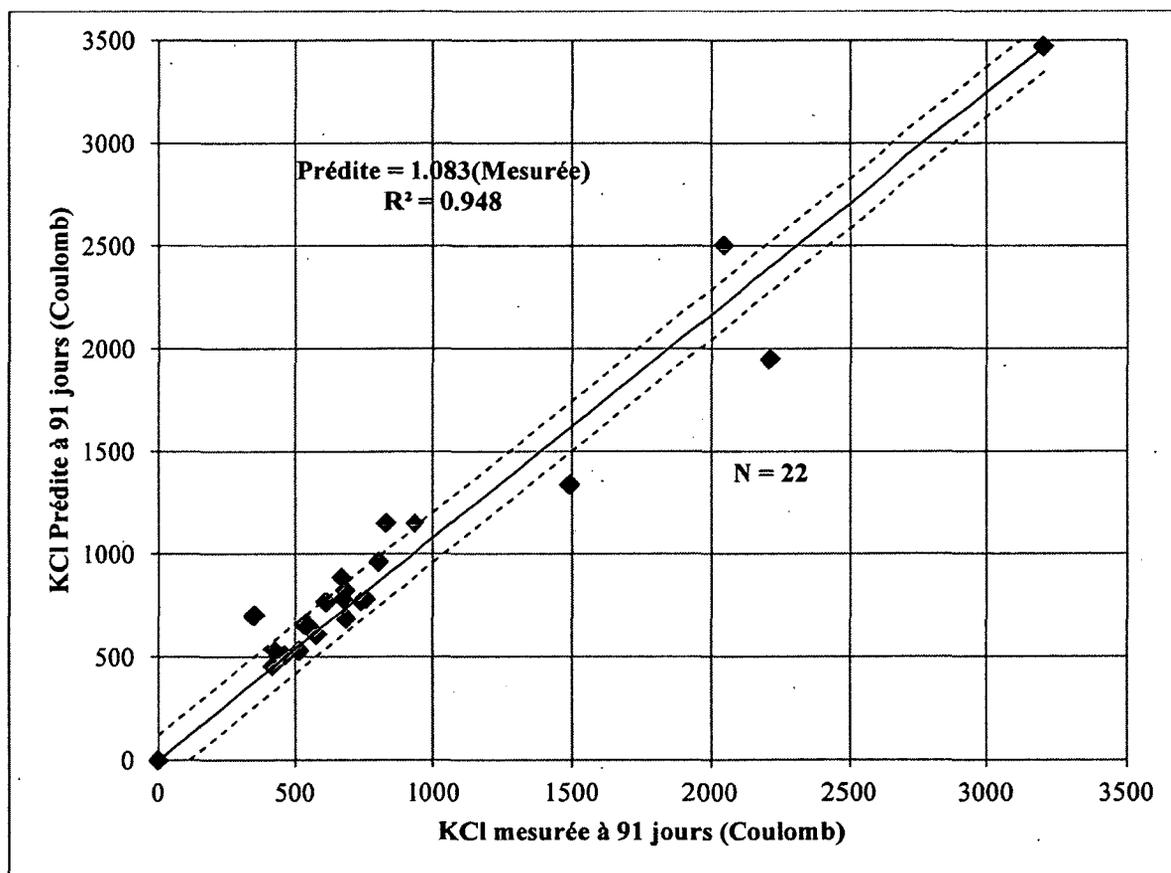


Figure 5-7: Validation pour la perméabilité aux ions chlores à 91 jours

5.1.4 Exploitation des modèles statistiques

Les modèles mathématiques développés représentent un outil très utile pour comprendre l'effet des interactions entre les divers paramètres de formulation et facilitent le protocole d'optimisation des mélanges du béton contenant la poudre de verre. L'analyse des modèles développés permet l'identification des tendances majeures et prédit une meilleure orientation pour les études futures.

L'objectif est d'illustrer l'utilité des modèles statistiques développés et de les exploiter pour développer une approche qui nous permet de mieux comprendre le comportement du béton incorporant de la poudre de verre. Il s'agit d'étudier, par exemple, l'influence du rapport E/L et du taux d'incorporation du verre à un dosage en liant donné sur le développement de la résistance en compression ainsi que sur la perméabilité aux ions chlore.

➤ La résistance en compression à 1 jour (MPa)

L'évolution de la résistance en compression à 1 jour en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre pour un dosage en liant de 375 kg/m^3 est présentée dans la figure 5-8. Pour des bétons avec le même rapport E/L, l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre diminue la résistance en compression du béton à 1 jour. Pour un pourcentage constant de la poudre de verre, la diminution de rapport E/L provoque une augmentation de la résistance à cet âge.

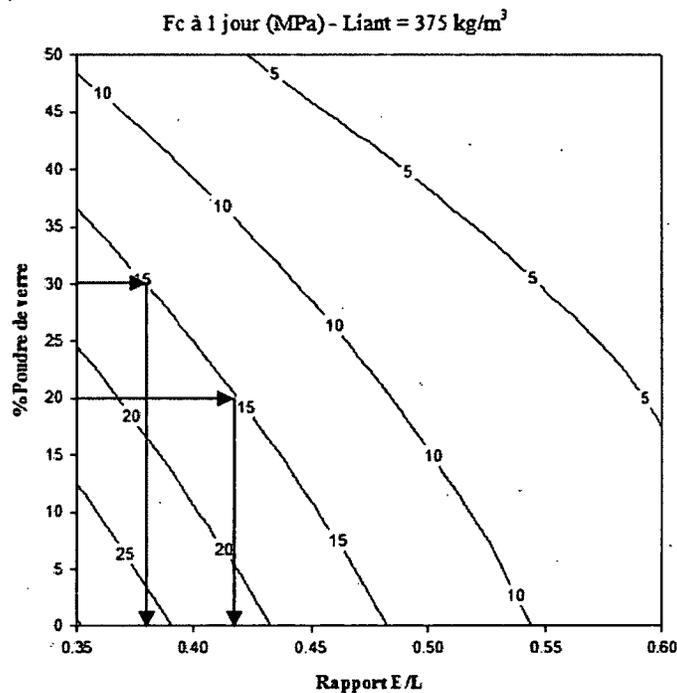


Figure 5-8: Iso-réponse de la résistance en compression à 1 jour en fonction du E/L et %PV

La résistance en compression à 1 jour est une caractéristique très importante dans les bétons des routes, bétons précontraints et tous les travaux du béton à une basse température ambiante. Elle est aussi essentielle pour les travaux qui nécessitent un décoffrage rapide [Neville, 1995]. Par exemple, l'incorporation de 20% de poudre de verre dans des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,42 engendre une résistance en compression de 15 MPa à 1 jour. Dans le cas d'utilisation de 30% de poudre de verre, il faut abaisser le rapport E/L à 0,38 pour maintenir la même résistance en compression à 1 jour (15 MPa).

Pour des bétons à haute performance proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les résistances en compression à 1 jour sont respectivement de 16,7 et 13,2 MPa. Cependant, le béton témoin développe une résistance de 23,8 MPa à 1 jour. Cette différence importante de la résistance en compression à 1 jour entre les mélanges avec de la poudre de verre et le témoin est due à la faible réactivité pouzzolanique de la poudre de verre à très jeune âge [Aladdine, 2009].

L'incorporation de 20% de la poudre de verre dans les bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,45 entraîne une diminution de la résistance en compression à 1 jour de 5,75 MPa par rapport au béton témoin formulé avec le même rapport E/L.

➤ **La résistance en compression à 7 jours (MPa)**

Le développement de la résistance en compression à 7 jours en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre pour un dosage en liant de 375 kg/m³ est présenté dans la figure 5-9.

La diminution du rapport E/L cause une augmentation de la résistance en compression à 7 jours. Cependant, l'augmentation du taux d'incorporation de poudre de verre entraîne une réduction de la résistance à 7 jours. Par exemple, un béton formulé avec un rapport E/L de 0,44 et incorporant 20% de poudre de verre engendre une résistance en compression de 25 MPa à 7 jours. En cas d'augmentation de pourcentage de la poudre de verre de 20% à 30% pour le même rapport E/L (0,44), la résistance en compression est de 21 MPa. Pour des bétons contenant 30% de la poudre de verre; il faut diminuer le rapport E/L à 0,40 pour maintenir la même valeur de la résistance en compression à 7 jour (25 MPa).

D'autres exemples de formulation sont présentés pour mieux comprendre les effets négatifs de l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre et l'augmentation du rapport E/L sur la diminution de la résistance à 7 jours. Une augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre de 20% à 30% entraîne une perte de résistance en compression à 7 jours de 4,20 MPa pour des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,41. Cependant, une augmentation du rapport E/L de 0,39 à 0,43 pour des bétons incorporant 20% de la poudre de verre engendre une perte de résistance en compression à 7 jours de 6,20 MPa. Alors, le rapport E/L a l'effet le plus significatif sur le développement de la résistance en compression à 7 jours suivi par l'effet de pourcentage de verre.

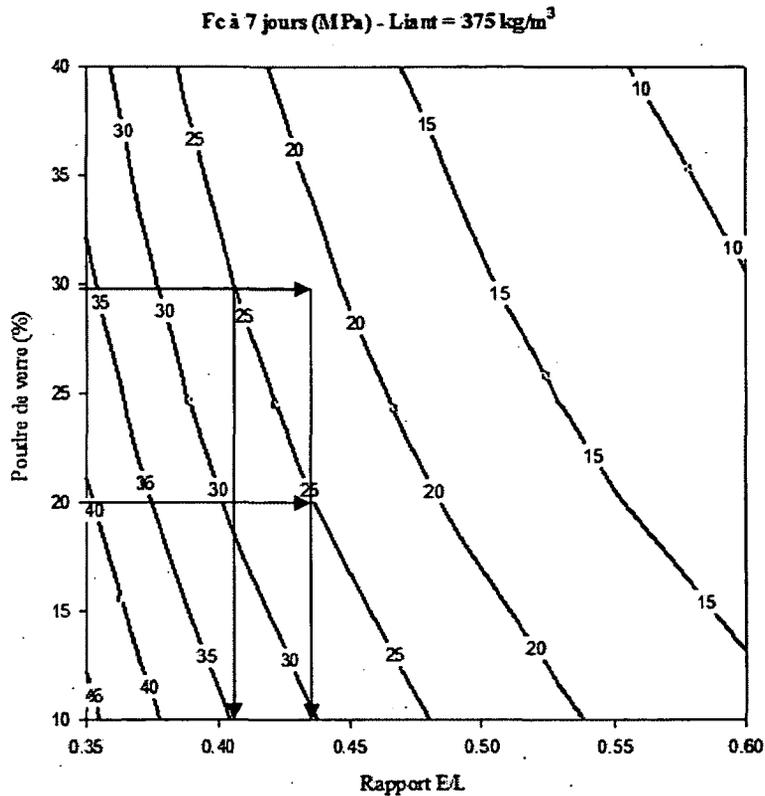


Figure 5-9: Iso-réponse de la résistance en compression à 7 jours en fonction de rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre

Dans le cas des bétons à haute performance proportionnés avec un rapport E/L de 0,40, les gains de résistance en compression entre 1 et 7 jours pour des taux de remplacement du ciment par la poudre de verre de 20% et 30% sont respectivement de 13,5 et 12,7 MPa. Par contre, pour les bétons conventionnels proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains de résistance en compression entre 1 et 7 jours sont respectivement de 8,7 et 7,4 MPa. Ce développement des résistances en compression de 1 à 7 jours a été observé aussi dans d'autres études [Aladdine, 2009; Zidol, 2009].

➤ **La résistance en compression à 28 jours (MPa)**

La résistance en compression à 28 jours est parmi les caractéristiques les plus importantes pour que le béton soit en utilisation dans les diverses applications de construction. Puisqu'elle est une propriété physique fondamentale, elle est souvent employée dans les calculs des ponts, bâtiments et autres

ouvrages. La plupart des bétons d'usage général ont des résistances en compression à 28 jours compris entre 20 et 35 MPa. Le développement de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport E/L et le taux d'incorporation de la poudre de verre (%PV) pour un dosage en liant de 375 kg/m³ est présenté dans la figure 5-10.

L'augmentation du rapport E/L a des effets négatifs sur la réduction de la résistance en compression à 28 jours. Cependant, la diminution du pourcentage de la poudre de verre cause une augmentation de la résistance en compression à 28 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de la poudre de verre développe une résistance en compression de 35 MPa à 28 jours. L'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 20% à 30% pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 entraîne une résistance en compression de 32 MPa à 28 jours. Pour avoir une résistance en compression à 28 jours de 35 MPa avec des bétons incorporant 30% de poudre de verre, il faut abaisser le rapport E/L à 0,42.

D'autres exemples de proportion sont présentés pour mieux comprendre l'effet de l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre sur la réduction de la résistance à 28 jours. Une augmentation du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre de 20% à 30% cause une réduction de la résistance en compression à 28 jours de 3,85 MPa pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,41. Alors, pour un rapport E/L fixe; une augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre provoque une réduction de la résistance en compression à 28 jours. La même tendance pour l'évolution de la résistance à 28 jours a été constatée par [Schwarz et al., 2008] sur des mélanges avec un rapport E/L de 0,40. Pour un taux d'incorporation de la poudre de verre de 20%, la diminution de rapport E/L de 0,47 à 0,39 provoque un gain de résistance en compression à 28 jours de 10,5 MPa. Alors, pour le même taux de remplacement du ciment par la poudre de verre, la réduction de rapport E/L provoque des gains significatifs de la résistance en compression à 28 jours.

Pour des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de poudre de verre, les gains de la résistance en compression entre 7 et 28 jours sont respectivement de ; 11,3 et 11,3 MPa. Par ailleurs, pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains sont respectivement de 9,7 et 9,8 MPa. Cette tendance de gain de résistance entre 7 et 28 jours est quasi similaire à celles observées dans d'autres études [Aladdine, 2009; Zidol, 2009].

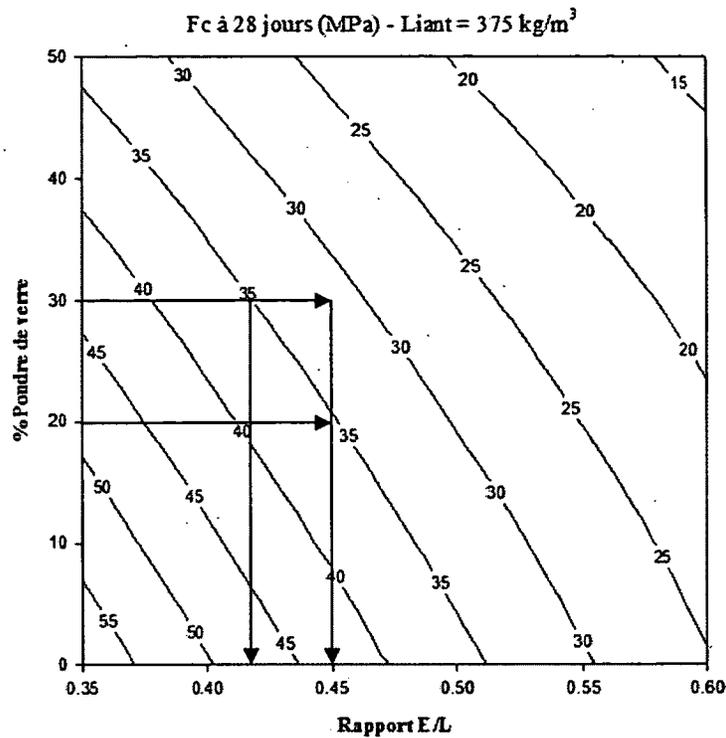


Figure 5-10: Iso-réponse pour la résistance en compression à 28 jours en fonction de rapport E/L et %PV

➤ La résistance en compression à 91 jours (MPa)

Le développement de la résistance en compression à 91 jours en fonction de rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre (%PV) pour un dosage en liant de 375 kg/m³ est présenté dans la figure 5-11.

L'augmentation du rapport E/L a des effets négatifs sur le développement de la résistance en compression à 91 jours. Cependant, la diminution du pourcentage de la poudre de verre cause une augmentation de la résistance en compression à 91 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,46 et incorporant 20% de poudre de verre développe une résistance en compression de 45 MPa à 91 jours. L'augmentation du pourcentage de verre de 20% à 30% pour le même rapport E/L (0,46) développe une résistance en compression de 42 MPa à 91 jours. Donc, on doit abaisser le rapport E/L à 0,44 pour avoir une résistance en compression de 45 MPa à 91 jours avec des bétons incorporant 30% de la poudre de verre.

D'autres exemples de formulation sont présentés pour mieux comprendre l'effet de l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre sur la réduction de la résistance à 91 jours. Une augmentation du taux du remplacement du ciment par la poudre de verre de 20% à 30% engendre une perte de résistance en compression à 91 jours de 2,50 MPa pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,53. Cependant, cette augmentation engendre une perte de la résistance de 3,9 MPa pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,37. On remarque que la perte de la résistance en compression est plus importante dans le cas des bétons formulés avec un faible rapport E/L. Quand, le rapport E/L augmente, la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre devient plus accentuée et plus développée dans le temps ce qui entraîne moins de perte de résistance en augmentant le pourcentage de la poudre de verre. [Aladdine, 2009] a précisé que la poudre de verre a besoin d'un environnement humide pour accentuer sa réactivité pouzzolanique dans le temps.

Pour un pourcentage de la poudre de verre fixe, la diminution du rapport E/L engendre une augmentation de la résistance en compression à 91 jours. Par exemple, pour des bétons incorporant 20% de poudre de verre, la diminution du rapport E/L de 0,47 à 0,39 entraîne des gains de résistance en compression à 91 jours de 12 MPa. Ces exemples de formulation montrent que le rapport E/L a l'effet le plus important sur la résistance en compression à 91 jours.

Pour des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains de résistance en compression entre 28 et 91 jours sont respectivement de 13 et 13,8 MPa. Par ailleurs, dans le cas des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains de résistance en compression entre 28 et 91 jours sont respectivement de 7,4 et 7,9 MPa. Alors, les bétons incorporant 20% et 30% de la poudre de verre possèdent un taux de développement de la résistance en compression entre 28 et 91 jours similaire quelque soit le rapport E/L étudié. Ce gain de résistance en compression à cet âge plus avancé montre l'effet bénéfique de la poudre de verre sur l'évolution de la résistance du béton dans le temps. Donc, la poudre de verre occasionne une faible augmentation de la résistance en compression entre 1 et 28 jours, mais elle accentue son développement à long terme. Cette tendance résulte de sa réactivité lente. Ce gain de résistance en compression entre 28 et 91 jours a été aussi observé par [Zidol, 2009].

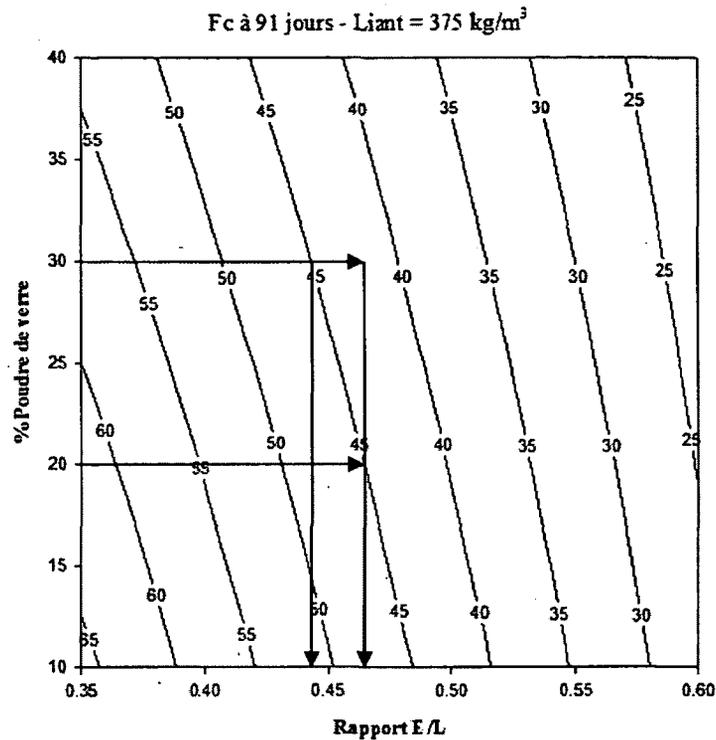


Figure 5-11: Iso-réponse pour la résistance en compression à 91 jours en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre

➤ **La résistance en compression à 180 jours (MPa)**

L'évolution de la résistance en compression à 180 jours en fonction du rapport E/L et du pourcentage de la poudre de verre (%PV) pour un dosage en liant de 375 kg/m³ est présentée dans la figure 5-12.

L'augmentation du rapport E/L a des effets négatifs sur le développement de la résistance en compression à 180 jours. Cependant, la diminution du pourcentage de la poudre de verre cause une augmentation de la résistance en compression à 180 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de poudre de verre engendre une résistance en compression à 180 jours de 50 MPa. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 20% à 30% entraîne une résistance en compression de 47 MPa à 180 jours pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45. Alors, on doit abaisser le rapport E/L à 0,44 pour avoir une résistance en compression à 180 jours de 50 MPa avec des bétons incorporant 30% de la poudre de verre.

D'autres exemples de formulations sont présentés pour comprendre l'effet de la diminution du rapport E/L sur l'augmentation de la résistance en compression à 180 jours pour un pourcentage fixe de la poudre de verre. Pour un pourcentage de la poudre de verre de 20%, la diminution de rapport E/L de 0,47 à 0,39 engendre une augmentation de la résistance en compression à 180 jours de 10 MPa.

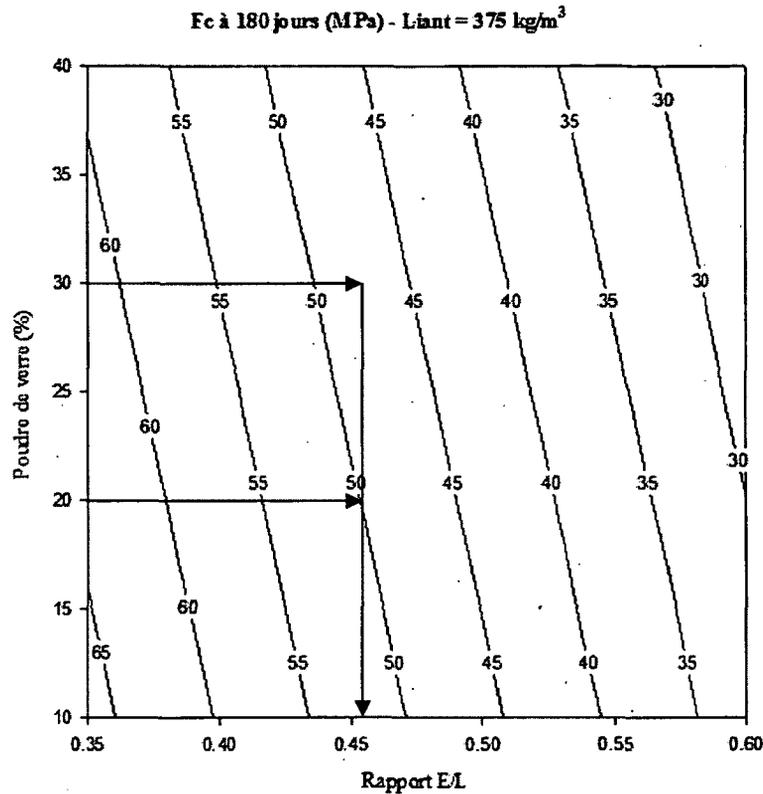


Figure 5-12: Iso-réponse de la résistance en compression à 180 jours en fonction du rapport E/L et %PV

Pour des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et contenant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains de résistance en compression entre 91 et 180 jours sont respectivement de 2,7 et 3,9 MPa. Alors, le gain de la résistance en compression augmente en fonction de l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre.

➤ **La résistance en compression à 1 an (MPa)**

L'évolution de la résistance en compression à 1 an en fonction du rapport E/L et le taux d'incorporation de la PV pour un dosage en liant de 375 kg/m³ est présentée dans la figure 5-13.

L'augmentation du rapport E/L a des effets négatifs sur le développement de la résistance en compression à 1 an. Cependant, la diminution du pourcentage de la poudre de verre cause une augmentation de la résistance en compression à 1 an. Par exemple, un béton formulé avec un rapport E/L de 0,42 et incorporant 20% de la poudre de verre développe une résistance en compression à 1 an de 60 MPa. Pour le même rapport E/L (0,42), une augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre de 20% à 30% engendre une résistance en compression à 1 an de 57 MPa. Alors, dans le cas des bétons incorporant 30% de la poudre de verre, on doit abaisser le rapport E/L à 0,40 pour avoir une résistance en compression de 60 MPa à 1 an.

D'autres exemples de formulation sont présentés pour voir l'effet de la diminution de rapport E/L sur l'augmentation de la résistance en compression à 1 an. Pour un pourcentage de la poudre de verre de 20%, la diminution du rapport E/L de 0,47 à 0,39 entraîne une augmentation de la résistance en compression à 1 an de 12 MPa.

Pour des mélanges proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains de la résistance en compression entre 180 jours et 1 an sont respectivement de 6 et 5,4 MPa. Pour les bétons formulés avec un rapport E/L de 0,55 et contenant 20% et 30% de la poudre de verre, les gains de résistance en compression entre 180 jours et 1 an sont respectivement de 3,10 et 2,50 MPa. Alors, la poudre de verre développe des gains significatifs de la résistance en compression entre 180 jours et 1 an. Une tendance quasi similaire à celle-ci a été observée par [Aladdine, 2009] sur des mélanges confectionnés avec des rapports E/L de 0,40 et 0,55.

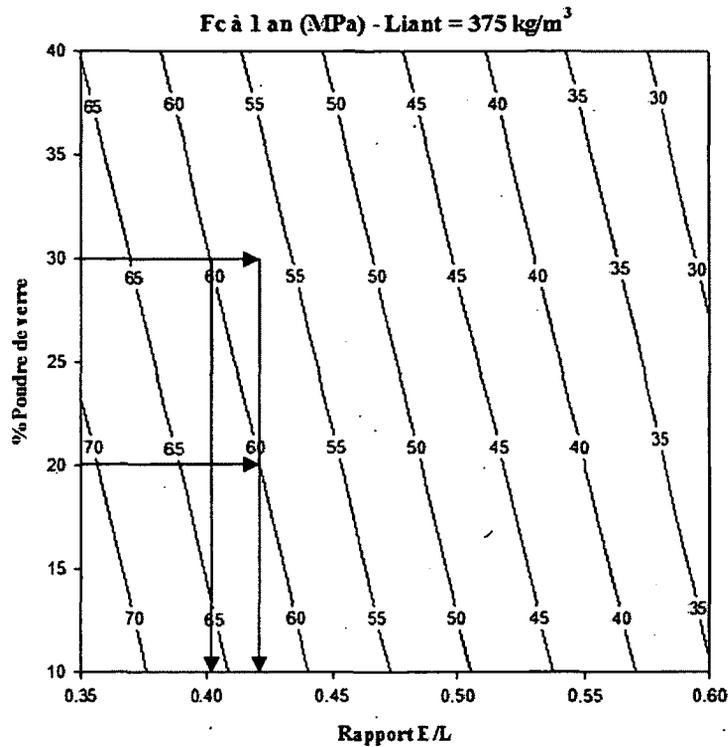


Figure 5-13: Iso-réponse pour la résistance en compression à 1 an en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre (%PV)

➤ **La perméabilité aux ions chlore à 28 jours (Coulombs)**

La perméabilité aux ions chlore à 28 jours en fonction du rapport E/L et du pourcentage de la poudre de verre (%PV) pour un dosage en liant de 375 kg/m³ est présentée dans la figure 5-14.

L'augmentation du rapport E/L entraîne une augmentation de la perméabilité aux ions chlore à 28 jours. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre engendre une réduction de la perméabilité aux ions chlore à 28 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,44 et incorporant 20% de la poudre de verre engendre une perméabilité de 3200 Coulombs à 28 jours. Pour le même rapport E/L (0,44), l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 20% à 30% entraîne une perméabilité aux ions chlores de 2600 Coulombs à 28 jours. Alors, pour le même rapport E/L, l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre a un effet important sur la réduction

de la perméabilité aux ions chlore à 28 jours. Un béton formulé avec un rapport E/L de 0,51 et contenant 30% de la poudre de verre développe une perméabilité aux ions chlores de 3200 Coulombs à 28 jours.

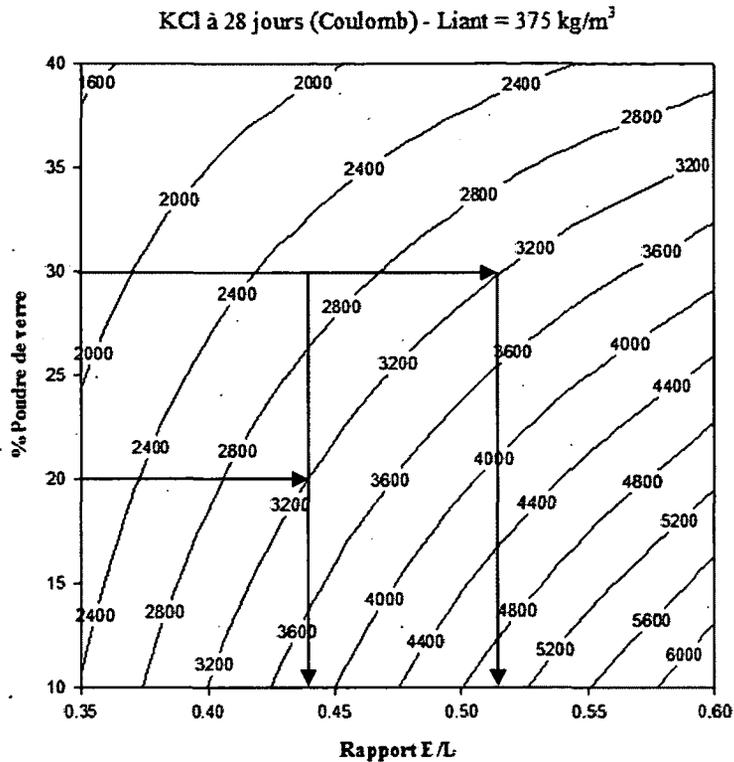


Figure 5-14: Iso-réponse pour la perméabilité aux ions chlores à 28 jours (Coulombs)

Pour un taux de remplacement de 30% du ciment par la poudre de verre, les bétons formulés avec des rapports E/L variant de 0,37 à 0,60 développent une perméabilité aux ions chlore modérée selon la classification donnée par la norme ASTM C1202.

Ces résultats montrent l'effet bénéfique de l'augmentation du taux d'incorporation de verre sur la réduction de la perméabilité à 28 jours. [Zidol, 2009] a précisé que la réduction de la perméabilité peut résulter de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui consomme la portlandite pour produire plus de gel de C-S-H et réduire davantage les pores connectés. La réduction de l'interconnectivité des pores occasionne une augmentation de la compacité des pores qui est à l'origine de la réduction de la perméabilité.

➤ **La perméabilité aux ions chlore à 56 jours (Coulombs)**

Les valeurs de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours en fonction du rapport E/L et du pourcentage de la poudre de verre (%PV) pour un dosage en liant de 375 kg/m³ sont présentées dans la figure 5-15.

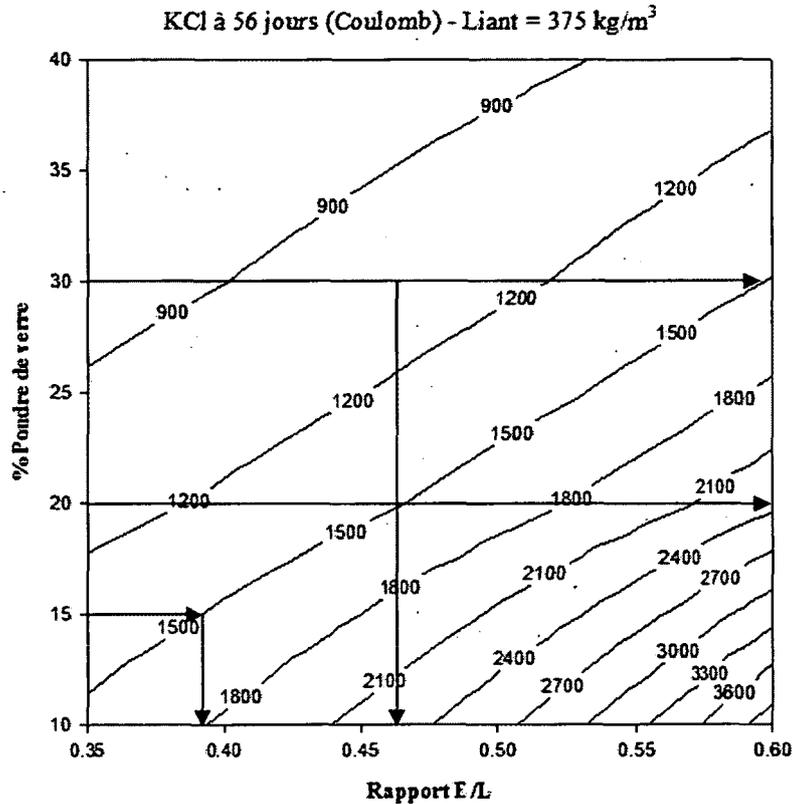


Figure 5-15: Iso-réponse de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours (Coulombs)

L'augmentation du rapport E/L entraîne une augmentation de la perméabilité aux ions chlore à 56 jours. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre engendre une réduction de la perméabilité aux ions chlore à 56 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,46 et incorporant 20% de la poudre de verre développe une perméabilité aux ions chlore de 1500 Coulombs à 56 jours. Pour le même rapport E/L (0,46), l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 20% à 30% provoque une perméabilité de 1100 Coulombs à 56 jours. Pour un pourcentage de la poudre de verre de 15%, on doit abaisser le rapport E/L à 0,39 pour avoir une perméabilité de 1500 Coulombs à 56 jours.

Un autre exemple de formulation pour des bétons ayant des rapports E/L élevés est présenté. Un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,60 et incorporant 30% de la poudre de verre développe une perméabilité aux ions chlore de 1500 Coulombs à 56 jours. Cependant, un béton formulé avec E/L de 0,60 et contenant 20% de la poudre de verre développe une perméabilité de 2400 Coulombs à 56 jours. Pour le même rapport E/L, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre entraîne une réduction significative de la perméabilité aux ions chlorures à 56 jours. Alors le pourcentage de la poudre de verre est le paramètre le plus important sur la perméabilité aux ions chlore à 56 jours.

Pour des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, la réduction de la perméabilité aux ions chlore de 28 à 56 jours est respectivement de 1458 et 1347 Coulombs. Pour les bétons formulés avec un rapport E/L de 0,55 et contenant 20% et 30% de la poudre de verre, la réduction de la perméabilité entre 28 et 56 jours est respectivement de 2578 et 2168 Coulombs. Alors, la réduction de la perméabilité est plus accentuée dans les bétons formulés avec des rapports E/L élevés ce qui montre l'effet plus important du dosage en eau sur la diminution de la perméabilité des bétons formulés avec de la poudre de verre. Les travaux effectués par [Jain et al., 2010; Neithalath, 2011] montrent aussi l'effet significatif de la poudre de verre sur la réduction de la perméabilité du béton entre 28 et 56 jours.

➤ **La perméabilité aux ions chlore à 91 jours (Coulombs)**

L'évolution de la perméabilité aux ions chlore à 91 jours en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre (%PV) est présenté dans la figure 5-16. La perméabilité à 91 jours pour un rapport E/L donné et un pourcentage de la poudre de verre donné a la même valeur quelque soit le dosage en liant étudié. Cette tendance se développe lorsque le dosage en liant n'a pas un effet significatif sur la perméabilité à 91 jours.

L'augmentation du rapport E/L entraîne une augmentation de la perméabilité aux ions chlore à 91 jours. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre engendre une réduction de la perméabilité aux ions chlore à 91 jours. Par exemple, un béton formulé avec un rapport E/L de 0,48 et incorporant 20% de la poudre de verre engendre une perméabilité aux ions chlore de 1000 Coulombs à 91 jours. Pour le même rapport E/L (0,48), l'augmentation de pourcentage de la poudre de verre de 20%

à 30% entraîne une perméabilité de 700 Coulombs à 91 jours. Cependant, le béton témoin proportionné avec un rapport E/L de 0,48 développe une perméabilité de 3000 Coulombs à 91 jours.

Pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, les perméabilités aux ions chlore à 91 jours sont respectivement de l'ordre de 30% et 21% celle du béton témoin. Tous les bétons proportionnés avec des rapports E/L inférieurs à 0,51 et contenant 20% de la poudre de verre affichent des perméabilités très faibles à 91 jours selon la classification donnée par la norme ASTM C1202.

Alors, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre est le paramètre le plus important sur la réduction de la perméabilité aux ions chlore à 91 jours. La réduction de la perméabilité des bétons avec de la poudre de verre par rapport au témoin est liée à la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre. Cette tendance est conforme aux résultats obtenus dans plusieurs travaux [Jain et al., 2010; Neithalath, 2011; Schwarz et al., 2008; Zidol, 2009].

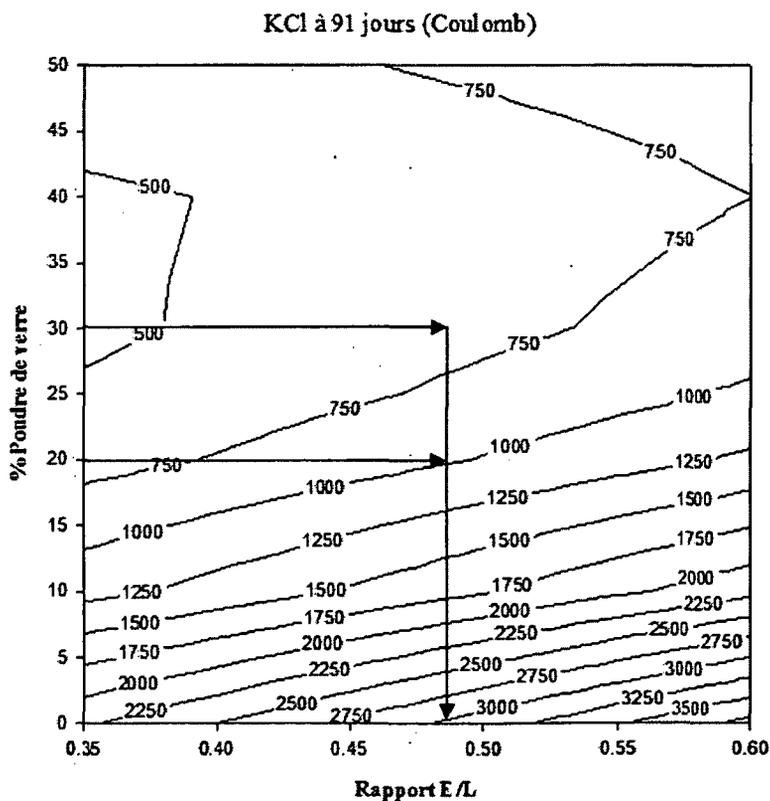


Figure 5-16: Iso-réponse pour la perméabilité aux ions chlores à 91 jours

➤ La perméabilité aux ions chlore à 180 jours (Coulombs)

Le développement de la perméabilité aux ions chlore à 180 jours en fonction du rapport E/L et du pourcentage de la poudre de verre (%PV) est présenté dans la figure 5-17. Le dosage en liant (kg/m^3) n'a aucun effet significatif sur la charge totale passée à 180 jours.

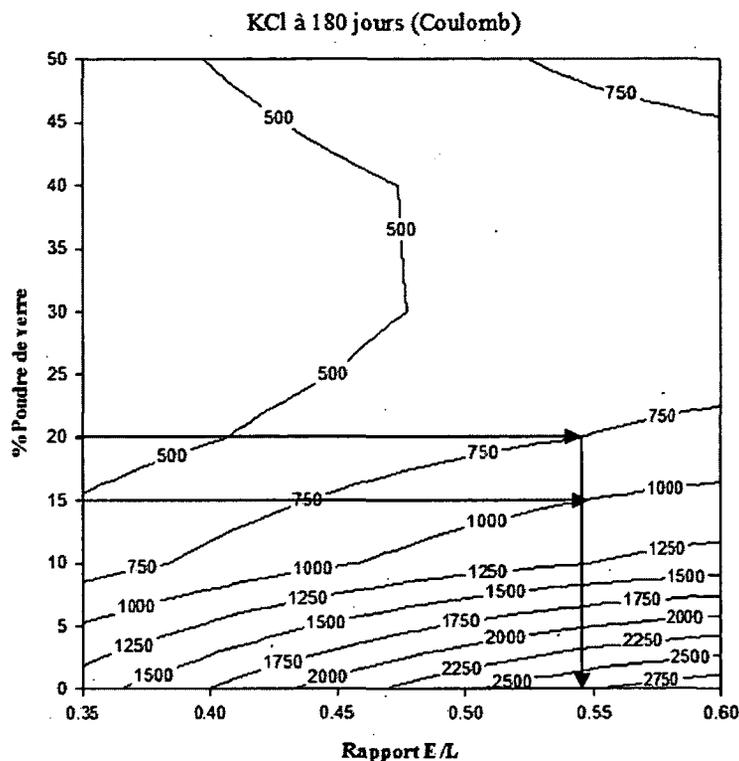


Figure 5-17: Iso-réponse pour la perméabilité aux ions chlores à 180 jours

L'augmentation du rapport E/L entraîne une augmentation de la perméabilité aux ions chlore à 180 jours. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre engendre une réduction de la perméabilité aux ions chlore à 180 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 15% de la poudre de verre engendre une perméabilité aux ions chlore à 180 jours de 1000 Coulombs. Pour le même rapport E/L (0,55), l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 15% à 20% développe une perméabilité de 750 Coulombs à 180 jours. Cependant, le béton témoin proportionné avec un rapport E/L de 0,55 affiche une perméabilité aux ions chlores de 2700 Coulombs à 180 jours.

Pour des bétons confectionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la Poudre de verre, les perméabilités aux ions chlores à 180 jours sont respectivement de l'ordre de 28% et 22% de celle du béton témoin à 180 jours. La réduction de la perméabilité aux ions chlores entre 91 et 180 jours pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et contenant 20% et 30% de la poudre de verre est respectivement de 280 et 150 coulombs. Cette tendance est conforme aux résultats obtenus par [Aladdine, 2009].

Pour un taux d'incorporation de 20% de la poudre de verre, la perméabilité aux ions chlores à 180 jours devient inférieure à 1000 Coulombs quelque soit le rapport E/L étudié. Donc, le taux d'incorporation de la poudre de verre est le paramètre le plus important sur la perméabilité aux ions chlores à 180 jours.

➤ **La perméabilité aux ions chlores à 1 an (Coulombs)**

Les valeurs de la charge totale passées à 1 an en fonction du rapport E/L et du pourcentage de la poudre de verre sont présentées dans la figure 5-18. Le dosage en liant (kg/m^3) n'a aucun effet significatif sur la perméabilité aux ions chlores à 1 an.

L'augmentation du rapport E/L entraîne une augmentation de la perméabilité aux ions chlore à 1 an. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre engendre une réduction de la perméabilité aux ions chlore à 1 an. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,56 et incorporant 10% de la poudre de verre développe une perméabilité de 1000 Coulombs à 1 an. Pour le même rapport E/L (0,56), l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 10% à 20% entraîne une perméabilité aux ions chlore à 1 an de 600 Coulombs. Cependant, un béton témoin formulé avec E/L de 0,56 affiche une perméabilité de 2250 Coulombs à 1 an.

D'autres exemples de formulations sont présentés pour montrer l'effet de la réduction du rapport E/L sur la perméabilité aux ions chlore à 1 an. Un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20 % de la poudre de verre développe une perméabilité aux ions chlores de 400 Coulombs à 1 an. Cependant, le béton témoin formulé avec un rapport E/L de 0,45 engendre une perméabilité aux ions chlores de 1700 Coulombs à 1an. Ces résultats montrent l'effet bénéfique de la réduction du rapport E/L et de l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre sur la réduction de la perméabilité aux ions chlores à 1an.

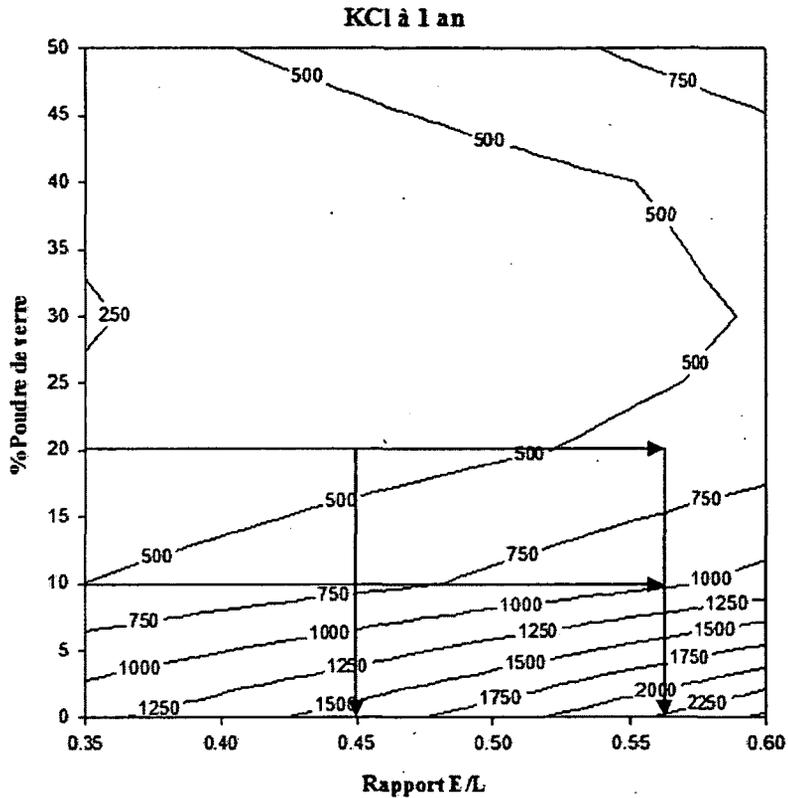


Figure 5-18: Iso-réponse de la perméabilité à 1 an (Coulombs)

5.1.5 Optimisation économique des mélanges du béton incorporant du verre

Pour faire une optimisation économique pour des bétons contenant de la poudre de verre, des courbes représentant la relation entre la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours et les différents coûts unitaires de la poudre de verre sont établis. Ceci permettra de choisir les mélanges les plus économiques en fonction de la teneur en poudre de verre.

Dans cette étude; le prix des gros granulats a été fixé à 8 \$ /t celui du sable est 11 \$ /t, et celui du ciment portland (GU) est 165 \$ /t. Ces prix représentent approximativement leurs coûts sur les marchés y compris leurs coûts de transport au Québec en 2011. Dans le cas de la poudre de verre, cinq catégories du prix sont présentées dans ce projet ; 50, 100, 150, 200 et 250 \$/t.

La figure 5-19 présente la relation entre la perméabilité aux ions chlores à 56 jours et le coût unitaire de la poudre de verre (100 \$/t) en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre pour une teneur liant de 375 kg/m³.

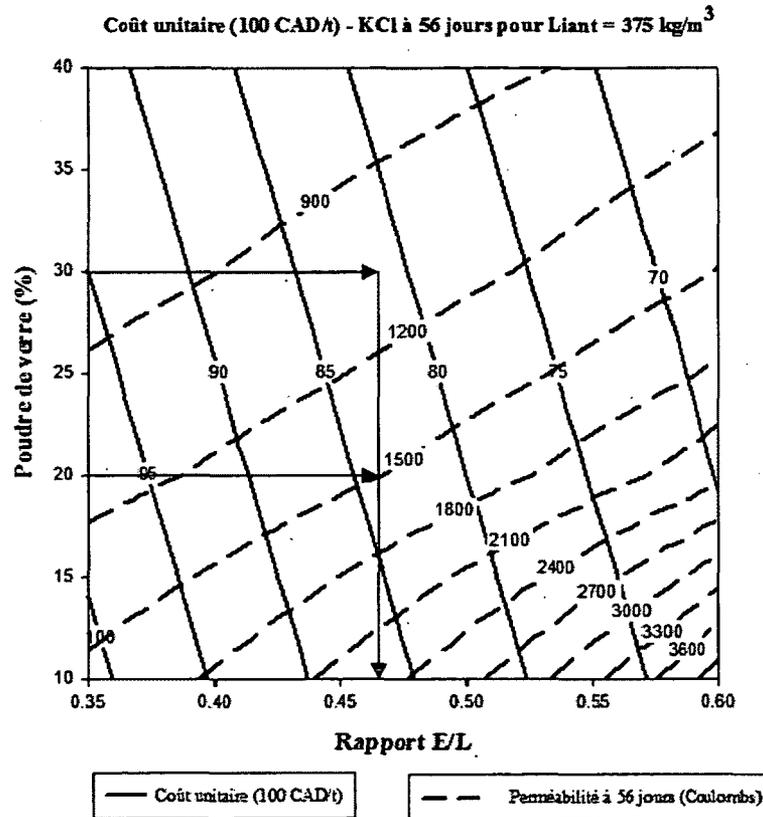


Figure 5-19: Relation entre le coût unitaire (100 \$/t) et KCl à 56 jours (Coulombs)

La réduction du rapport E/L et du taux d'incorporation de la poudre de verre engendrent une augmentation du prix unitaire du béton. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,46 et incorporant 20% de la poudre de verre entraîne une perméabilité aux ions chlores de 1500 Coulombs à 56 jours et son prix unitaire est de 84 \$ /m³. Pour le même rapport E/L (0,46), l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre de 20% à 30% résulte en une perméabilité de 1100 Coulombs à 56 jours et son coût unitaire est de 81 \$ /m³. Alors, pour le même rapport E/L ; l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre entraîne une réduction de la perméabilité à 56 jours et du coût unitaire du béton pour un prix unitaire de la poudre de verre de 100 \$ /t.

La figure 5-20 présente la relation entre la perméabilité aux ions chlores à 56 jours et le coût unitaire de la poudre de verre (200 \$/t) en fonction du rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre pour une teneur en liant de 375 kg/m³.

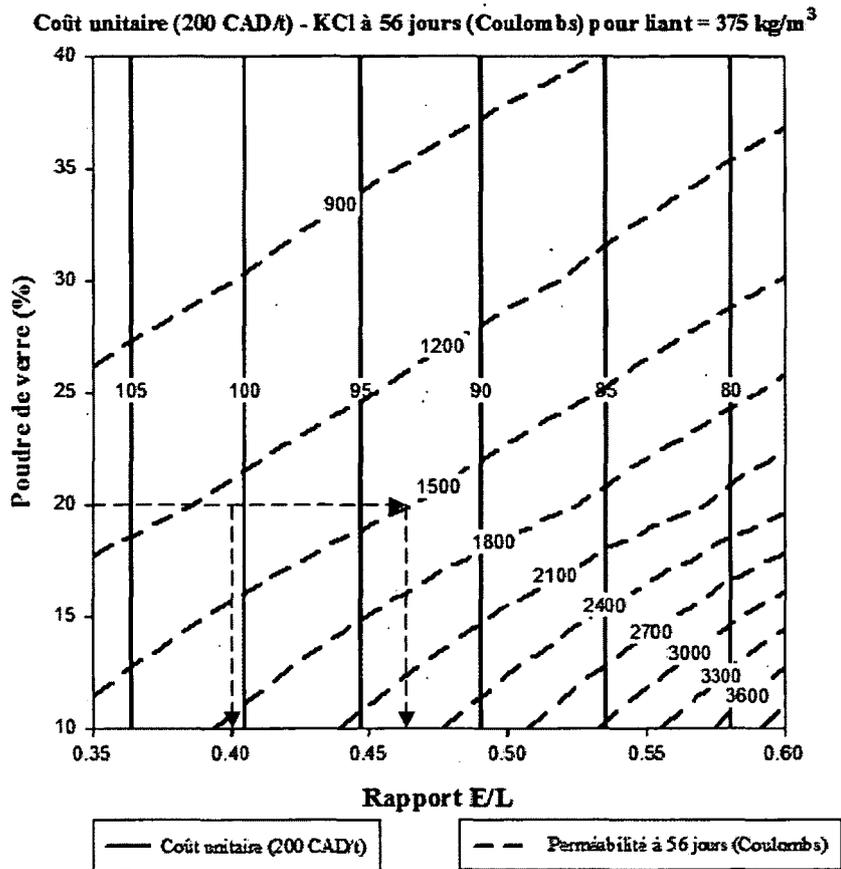


Figure 5-20: Relation entre le coût unitaire (200 \$/t) et KCl à 56 jours

La réduction du rapport E/L entraîne une augmentation du prix unitaire du béton et une diminution de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours. Par exemple, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,46 et incorporant 20% de la poudre de verre engendre une perméabilité aux ions chlores de 1500 Coulombs à 56 jours et un prix unitaire de 93 \$ /m³. Pour le même pourcentage de poudre de verre (20%), la réduction du rapport E/L à 0,40 développe une perméabilité de 1250 Coulombs à 56 jours et son coût unitaire est 100 \$ /m³.

Pour faire une optimisation économique pour des bétons contenant de la poudre de verre, des courbes représentant la relation entre la résistance en compression à 28 jours et la perméabilité aux ions chlore à

56 jours pour différentes prix de la poudre de verre sont établis. Ceci permettra de choisir les mélanges les plus économiques en fonction des caractéristiques requises.

La relation entre la résistance en compression à 28 jours, la perméabilité à 56 jours et le coût unitaire du béton est présentée dans la figure 5-21. La résistance en compression à 28 jours et la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours ont été établies pour différents rapports E/L et taux de remplacement du ciment par le verre à un dosage en liant de 375 kg/m³. Les rapports E/L présentés ici s'étalent de 0,35 à 0,60 tandis que les pourcentages de verre varient de 10% à 40%. Dans ce cas, le prix unitaire de la poudre de verre est fixé à 150 \$/t.

Un mélange formulé avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de la poudre de verre a une résistance en compression à 28 jours de 35 MPa et une valeur de perméabilité à 56 jours de 1450 Coulombs. Ce mélange coûte un prix unitaire de 90 \$ /m³.

Un mélange du béton à haute performance proportionné avec un rapport E/L de 0,35 et incorporant 20% de PV développe une résistance en compression à 28 jours de 47 MPa et une perméabilité aux ions chlorés à 56 jours de 1100 Coulombs. Le coût de cette formulation est de 100 \$/m³. Des bétons contenant 100% du ciment portland confectionnés par [Zidol, 2010] avec des rapports E/L de 0,35 et 0,45 développent des valeurs de perméabilité aux ions chlorés à 56 jours respectivement de 2100 et 2919 coulombs. Les coûts de ces formulations sont quasi-similaires aux bétons formulés avec les mêmes rapports E/L mais incorporant 20% de poudre de verre. Alors, pour le même rapport E/L, l'incorporation de 20% de la poudre de verre provoque une réduction significative de la perméabilité à 56 jours par rapport au béton témoin.

Pour un taux d'incorporation de la poudre de verre de 30%, un mélange formulé avec un rapport E/L de 0,45 montre une résistance en compression à 28 jours de 32 MPa et une perméabilité à 56 jours de 1000 Coulombs. Cependant, une légère diminution du rapport E/L est requise pour obtenir une résistance à 28 jours de 35 MPa pour ce taux de remplacement. Donc, un béton proportionné avec un rapport E/L de 0,42 et incorporant 30% de la poudre de verre peut développer une résistance en compression de 35 MPa à 28 jours, une perméabilité aux ions chlorés à 56 jours de 900 Coulombs pour un coût unitaire de 94 \$/m³.

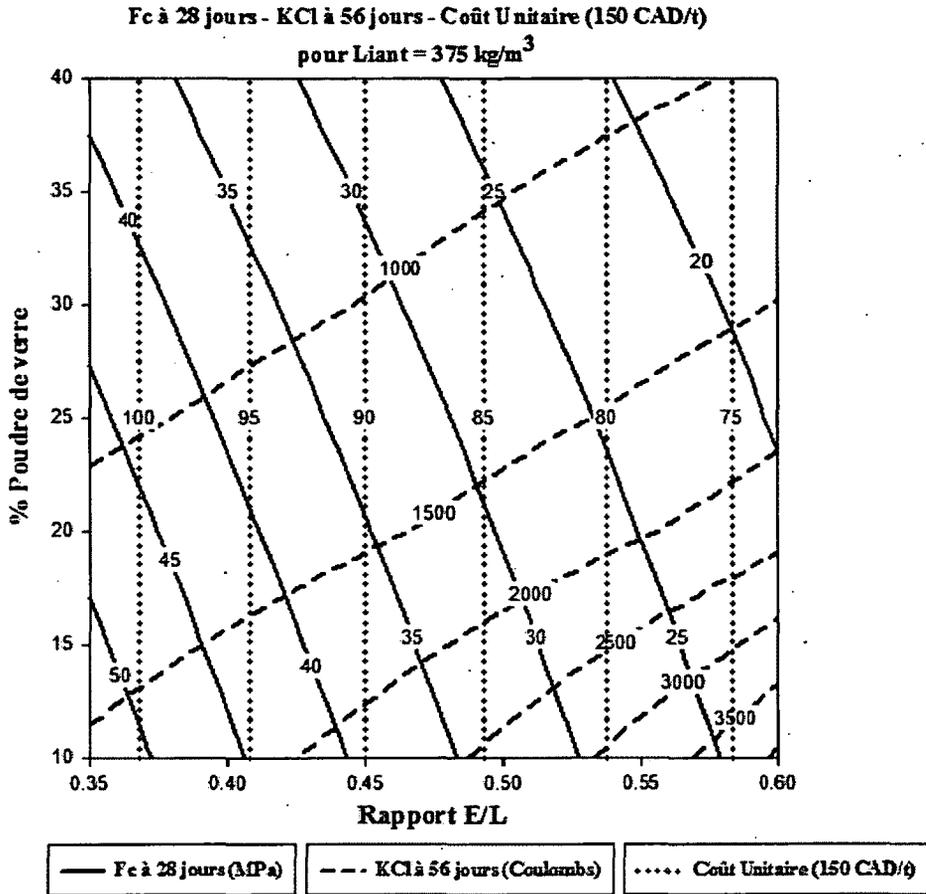


Figure 5-21: Relation entre Fc à 28 jours & Perméabilité à 56 jours pour une catégorie de prix de (150 \$/t) en fonction de rapport E/L, %PV et liant de 375 kg/m³

La variation de la résistance en compression à 28 jours et de la perméabilité aux ions chlorés à 91 jours avec différents rapports E/L et différents pourcentages de la poudre de verre est présentée dans la figure 5-22.

Un béton formulé avec un rapport E/L de 0,45 et contenant 100% de ciment portland développe une résistance en compression de 43 MPa à 28 jours et une perméabilité de 2800 Coulombs à 91 jours. Cependant, l'incorporation de 20% de la poudre de verre pour le même rapport E/L entraîne une réduction très importante de la perméabilité à cet âge (de 2800 à 900 Coulombs). En générale, les bétons proportionnés sans poudre de verre montrent des valeurs de perméabilité aux ions chlorés supérieurs à 2000 Coulombs à 91 jours pour les différents rapports E/L étudiés.

D'autres courbes iso-réponses pour les différentes propriétés visées avec des différents dosages en liant sont présentées dans l'annexe 1.

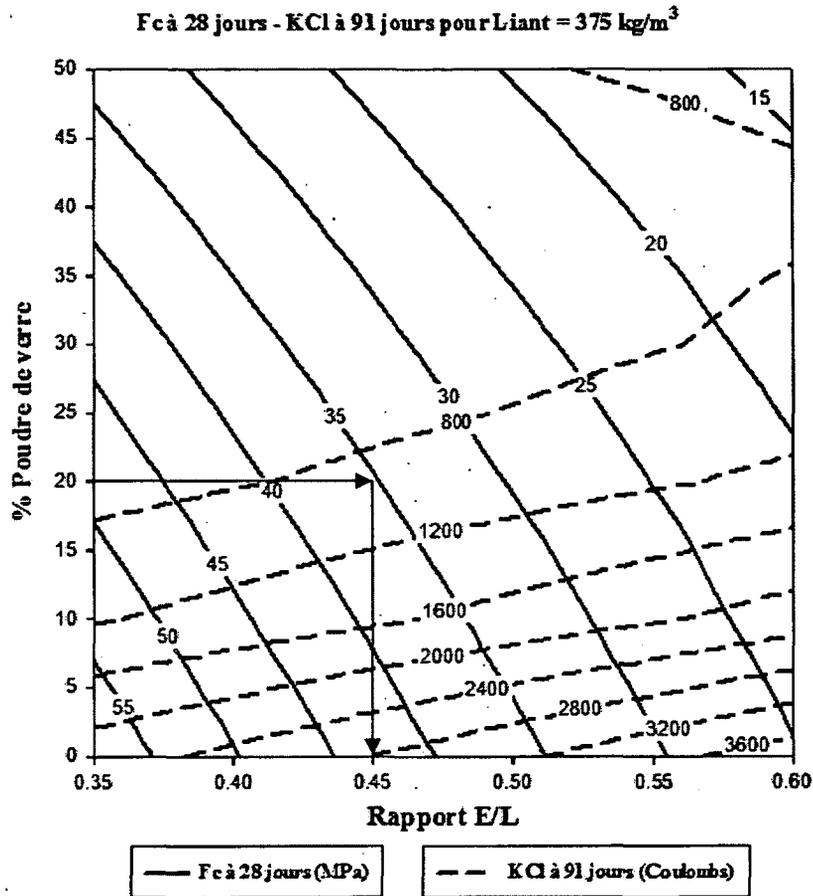


Figure 5-22: Relation entre Fc à 28 jours & Perméabilité à 91 jours pour une teneur en liant de 375 kg/m³

5.1.6 Conclusions des résultats de la phase 1

- Les paramètres de formulation étudiés dans le plan factoriel sont; le rapport E/L, le pourcentage de la poudre de verre et le dosage en liant (kg/m^3). Des modèles statistiques sont établis et validés pour des bétons ayant différents rapports E/L et pourcentages de la poudre de verre.
- Le rapport E/L est le paramètre le plus influent sur les résistances en compression et les coûts unitaires du béton.
- Le rapport E/L et le pourcentage de la poudre de verre présentent des effets quasi semblables sur les perméabilités aux ions chlores à 28 jours et 1 an.
- Le pourcentage de la poudre de verre est le paramètre le plus influent sur les perméabilités aux ions chlores à 56, 91 et 180 jours.
- Les essais de validation montrent que les modèles statistiques établis sont fiables.
- Les abaques établis permettent de formuler des bétons ayant différentes propriétés visées notamment, la résistance en compression et la perméabilité aux ions chlores.
- Pour un rapport E/L donné, l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre de 20% à 30% engendre une réduction significative de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours.
- Pour un rapport E/L donné, les bétons incorporant 10% de la poudre de verre développent une réduction significative de la perméabilité aux ions chlores par rapport au béton témoin à 91, 180 jours et 1 an.
- Pour des bétons incorporant 20% de la poudre de verre, la réduction du rapport E/L de 0,45 à 0,40 entraîne une augmentation importante des résistances en compression à 1 et 28 jours.
- Les bétons formulés avec différents rapports E/L et incorporant différents pourcentages de la poudre de verre engendrent des gains importants de la résistance en compression entre 28 et 91 jours.
- Des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de la poudre de verre développent une résistance en compression à 28 jours de 35 MPa et une perméabilité aux ions chlores à 56 jours de 1500 Coulombs. Cependant, des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,42 et incorporant 30% de la poudre de verre développent une résistance en compression à 28 jours de 35 MPa et une perméabilité aux ions chlores à 56 jours de 900 Coulombs.

- Les bétons formulés avec un rapport E/L de 0,50 et incorporant 20% de la poudre de verre développent une perméabilité aux ions chlores très faible à 91 jours selon la classification donnée par la norme ASTM C1202 (≤ 1000 Coulombs). Les bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 10% de la poudre de verre développent une perméabilité aux ions chlores très faible à 1 an selon la classification donnée par la norme ASTM C1202 (≤ 1000 Coulombs).
- L'incorporation de la poudre de verre dans le béton peut produire des mélanges durables et économiques.

5.2 Phase 2 - Caractérisation et durabilité des mélanges optimisés

La composition des bétons de cette phase est présentée dans la section 4.6 aux tableaux 4-8 et 4-9.

5.2.1 Propriétés des mélanges à l'état frais

Les valeurs de l'affaissement, de la teneur en air et de la masse volumique (kg/m^3) pour les bétons incorporant de la poudre de verre sont présentées au tableau 5-18.

Tableau 5.18: Les propriétés à l'état frais pour les bétons binaires

Mélange	*Dosage en ARE (ml/m^3)	**Dosage en AEA ($\text{ml}/100 \text{ kg}$)	Affaissement (mm)		Air (%)		Masse volumique (kg/m^3)	
			10 min.	60 min.	10 min.	60 min.	10 min.	60 min.
Témoin	975	43	120	85	7,8	6,4	2260	2320
15PV	975	51	60	50	5,2	4,8	2330	2360
20PV	975	62	50	45	5,3	4,7	2290	2300
25PV	975	77,8	80	50	8,0	7,0	2180	2220

*ARE : Agent réducteur d'eau, ** AEA : Agent entraîneur d'air

Pour un dosage fixe en ARE, l'incorporation de la poudre de verre résulte en une réduction de l'affaissement. Par exemple, les bétons incorporant de la poudre de verre engendrent des valeurs de l'affaissement entre 50 et 80 mm après 10 minutes du contact eau-liant. Ces valeurs d'affaissement se trouvent à l'intérieur de la limite ($80\text{mm} \pm 30 \text{ mm}$) recommandée par la norme CAN/CSA-A23.1. Cependant, le béton témoin entraîne l'affaissement le plus élevé. Cette augmentation de l'affaissement du béton témoin peut être expliquée par la finesse de la poudre de verre utilisée pour la formulation des bétons. Cette finesse est 1,1 fois celle du ciment portland.

Pour une teneur en air comprise entre 5% et 8%, les bétons incorporant de la poudre de verre requièrent des dosages en AEA légèrement supérieure à ceux du témoin. La teneur en air est entre 5,2% et 8% après 10 minutes du contact eau-liant. Cependant, elle est entre 4,7% et 7% après 60 minutes du contact eau-liant. Alors, la teneur en air ne subit pas une perte significative entre 10 et 60 minutes.

Les valeurs des propriétés à l'état frais pour les bétons ternaires sont présentées dans le tableau 5-19.

Tableau 5.19: Les propriétés à l'état frais pour les bétons ternaires

Mélange	*Dosage en ARE (ml/m ³)	**Dosage en AEA (ml/100 kg)	Affaissement (mm)		Air (%)		Masse volumique (kg/m ³)	
			10 min.	60 min.	10 min.	60 min.	10 min.	60 min.
Témoin	975	43	120	85	7,8	6,4	2264	2316
20 PV+5FS	1105	75,6	70	50	5,4	4,5	2320	2351
Tercem3000	1105	62,5	100	90	7,3	6,8	2275	2289
TerC 3	999	96	80	60	5,0	4,5	2327	2340

*ARE : Agent réducteur d'eau, ** AEA : Agent entraîneur d'air

La demande en ARE pour les bétons ternaires est légèrement supérieure à celle du béton témoin. Dans le cas des bétons proportionnés avec (20%PV+ 5% FS) et avec le ciment ternaire (Tercem3000), le dosage en ARE est de 1105 ml/m³. Cependant, pour le béton formulé avec le ciment ternaire (TerC³), il est de 999 ml/m³. Les valeurs de l'affaissement des bétons ternaires après 10 minutes du contact eau-liant se trouvent dans la limite (80mm ± 30 mm) recommandée par la norme CAN/CSA-A23.1.

Pour avoir une teneur en air comprise entre 5% et 8%, les bétons ternaires requièrent des dosages en AEA légèrement supérieures à celui du béton témoin. Dans le cas du béton proportionné avec (20%PV+5%FS), cette demande en AEA est de 75,6 ml/100 kg. Pour les bétons ternaires, la teneur en air est entre 5% et 7,3% après 10 minutes du contact eau-liant. Cependant, elle est entre 4,5% et 6,8% après 60 minutes du contact eau-liant. Alors, la teneur en air ne subit pas une perte significative entre 10 et 60 minutes.

5.2.2 Résistance en compression

Les résistances en compression des bétons binaires sont présentées dans le tableau 5-20 et illustrées dans les figures 5-24 et 5-25. Les résistances en compression moyennes sont obtenues avec un écart-type acceptable quelque soit l'âge du béton. La figure 5-23 montre que les bétons incorporant 15% et 25% de la poudre de verre possèdent des résistances en compression à 7 jours respectivement de 93% et 83% par rapport à celles du béton témoin (100% du ciment portland). Les bétons incorporant 15% et 20% de

la poudre de verre développent des résistances en compression légèrement supérieures à 35 MPa à 28 jours. Le taux de développement de la résistance en compression entre 28 et 56 jours est seulement 2% pour le béton témoin. Cependant, ce taux pour les bétons contenant 20% et 25% de la poudre de verre est respectivement de 13% et 18%. Cette tendance montre un développement de résistance en compression relativement proportionnel avec le taux d'incorporation de la poudre de verre à 56 jours.

Tableau 5.20: Les résistances en compression pour les bétons binaires

Mélange	Résistance en compression (MPa)				
	1 jour	7 jours	28 jours	56 jours	91 jours
Tém.0.45	15,5 (0,75)	29,7 (0,71)	40,8 (1,04)	41,5 (1,99)	45,8 (2,49)
0.45-15PV	17,4 (0,28)	27,8 (2,19)	36,4 (0,71)	38,4 (0,21)	41,7 (2,71)
0.45-20PV	16,6 (0,42)	29,8 (2,05)	35,9 (0,07)	41,1 (2,38)	47 (1,77)
0.45-25PV	12,1 (0,42)	24,8 (0,45)	31,7 (1,73)	38,8 (0,07)	41,2 (0,85)

(): écart-type

À l'âge de 91 jours, la résistance en compression du béton incorporant 20% de la poudre de verre dépasse légèrement celle du béton témoin. Ce comportement est expliqué par l'effet bénéfique d'incorporer 20% de la poudre de verre sur l'évolution de la résistance en compression aux âges plus avancés. Ces résultats sont conformes avec ceux obtenus par [Patagundi et al., 2008] sur des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant différents pourcentages de la poudre de verre.

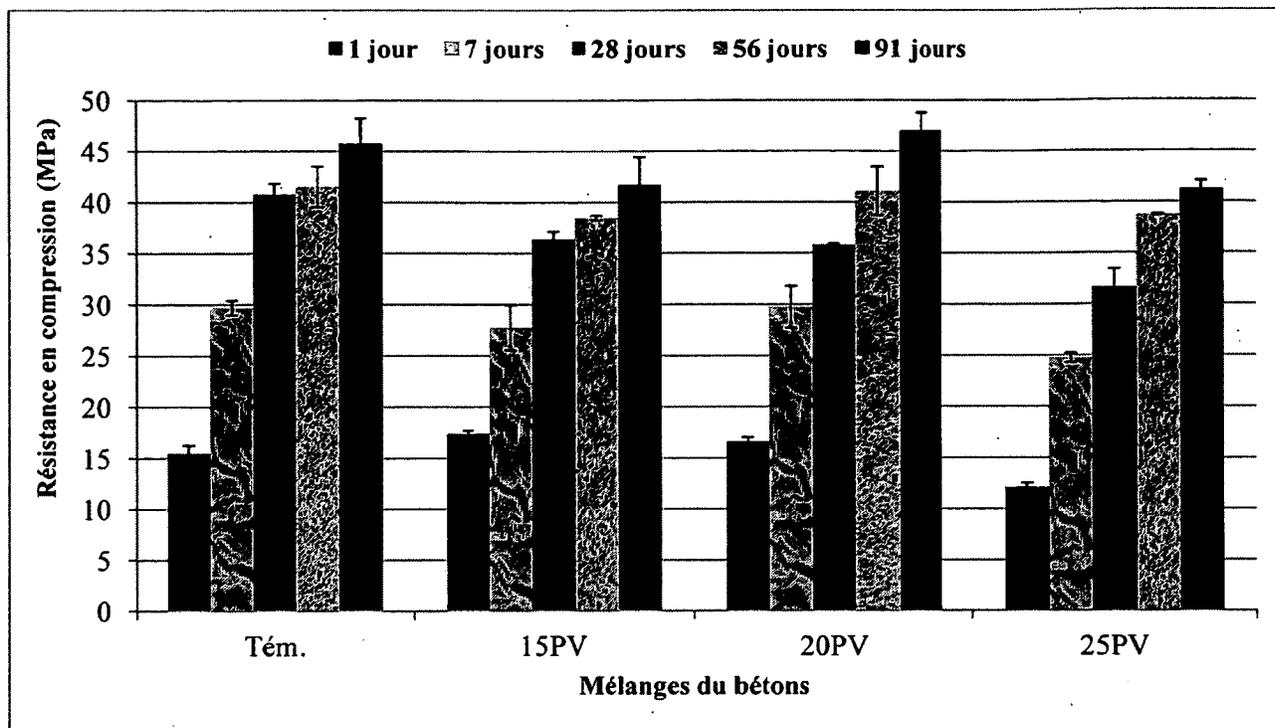


Figure 5-23: Résistance en compression pour les bétons binaires

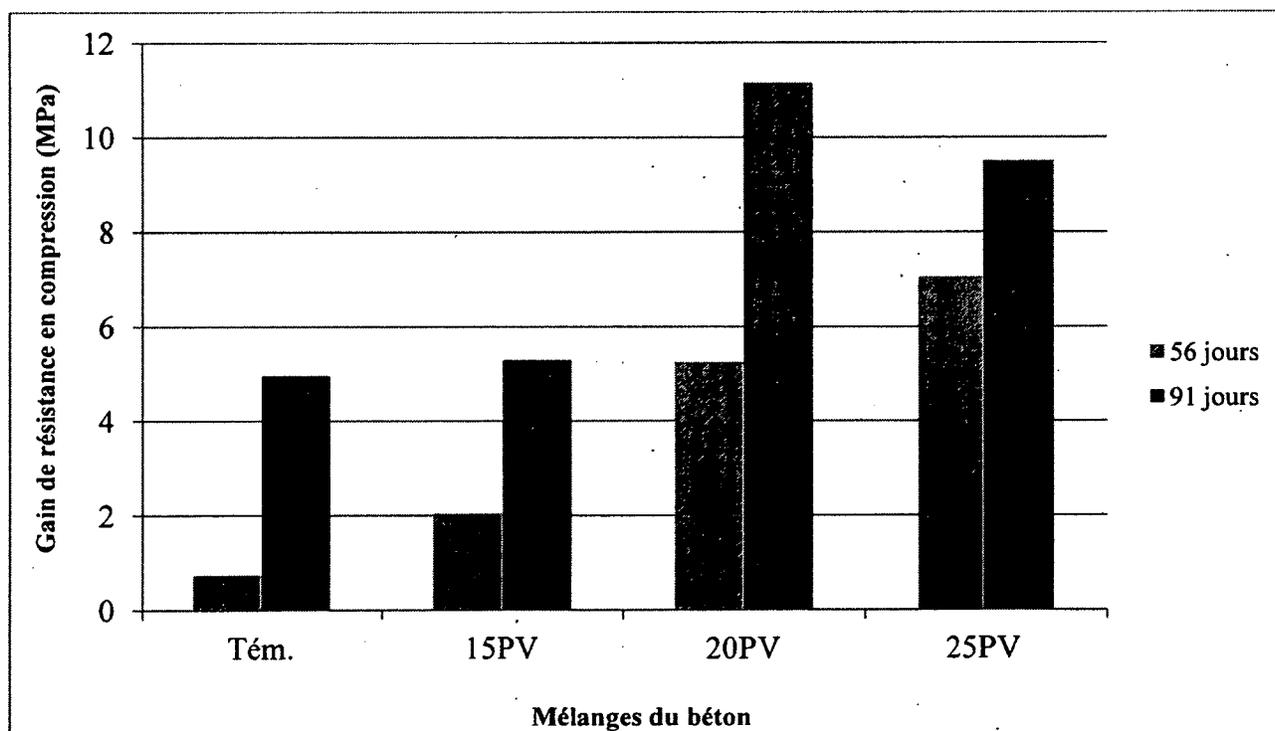


Figure 5-24: Le gain de résistance en compression pour les bétons binaires par rapport à 28 jours

Le gain de résistance en compression pour les bétons incorporant de la poudre de verre est illustré dans la figure 5-24. Le gain de résistance en compression est défini comme la différence entre la résistance en compression à un âge donné et celle obtenue à l'âge de 28 jours. Les gains de résistance en compression à 56 et 91 jours des bétons incorporant de la PV sont supérieurs à celui du témoin. Tous les bétons incorporant de la PV entraînent des gains de résistance très significatifs à l'âge de 56 jours, il semble que le gain de résistance en compression est proportionnel avec le taux d'incorporation de la poudre de verre dans le béton. Le béton incorporant 20% de la poudre de verre affiche le gain de la résistance en compression le plus important à 91 jours.

Les résistances en compression pour les bétons ternaires sont présentées dans le tableau 5-21 et illustrées dans les figures 5-25 et 5-26. Les résistances en compression moyennes sont obtenues avec un écart-type acceptable quelque soit l'âge du béton. Les valeurs de l'écart-type sont conformes avec les exigences des normes ACI 214R-02.

Tableau 5.21: La résistance en compression pour les mélanges ternaires

Mélange	Résistance en compression (MPa)				
	1 jour	7 jours	28 jours	56 jours	91 jours
Tém.0.45	15,5 (0,75)	29,7 (0,71)	40,8 (1,04)	41,5 (1,99)	45,8 (2,49)
20 PV + 5 FS	13,7 (0,69)	30,8 (0,78)	44,4 (2,05)	50,8 (0,85)	51,4 (3,32)
Ter cem3000	12,8 (0,35)	29,3 (2,69)	41,7 (0,49)	43,4 (0,81)	45,5 (2,21)
TerC3	15 (0,47)	29,9 (1,13)	43,7 (2,69)	51,2 (0,92)	54,8 (3,46)

() : écart-type

Les bétons ternaires développent des résistances en compression légèrement inférieures à celle du béton témoin à l'âge de 1 jour. Cependant, à l'âge de 7 jours, ils développent des résistances en compression semblables à celle du témoin. À l'âge de 28 jours, le béton proportionné avec (20%PV+5%FS) engendre une résistance en compression de 44,4 MPa, soit 3,6 MPa supérieure à celle du témoin. Cette augmentation de la résistance en compression à 28 jours semble être liée à l'ajout de la fumée de silice qui possède la tendance à plafonner la résistance en compression à court et à moyen terme [Neville, 1995]. Les bétons proportionnés avec (20%PV+5%FS) et le ciment ternaire (TerC³) développent des résistances en compression semblables à 28 jours.

À l'âge de 56 jours, les bétons formulés avec (20%PV+5%FS) et avec le ciment ternaire (TerC³) engendrent des résistances en compression respectivement de 50,8 et 51,2 MPa à 56 jours, soit 9,3 et 9,7

MPa supérieurs à celle du béton témoin. Cependant, le béton proportionné avec le ciment ternaire (Tercem3000) développe une résistance en compression légèrement supérieure à celle du béton témoin à 56 jours. À 91 jours, les bétons ternaires formulés avec (20%PV+5%FS) et TerC3 engendrent des résistances en compression respectivement de 51,4 et 54,8 MPa soit, 5,6 et 9 MPa supérieure à celle du béton témoin. Cependant, le ternaire avec Tercem3000 développe une résistance semblable à celle du témoin à 91 jours.

Alors, les bétons formulés avec (20%PV+5%FS) et avec le ciment ternaire (TerC³) développe des résistances en compression semblables jusqu'à l'âge de 56 jours. Cependant, la résistance en compression du béton incorporant le ciment (TerC³) dépasse légèrement celle du béton formulé avec (20%PV+5%FS) à 91 jours.

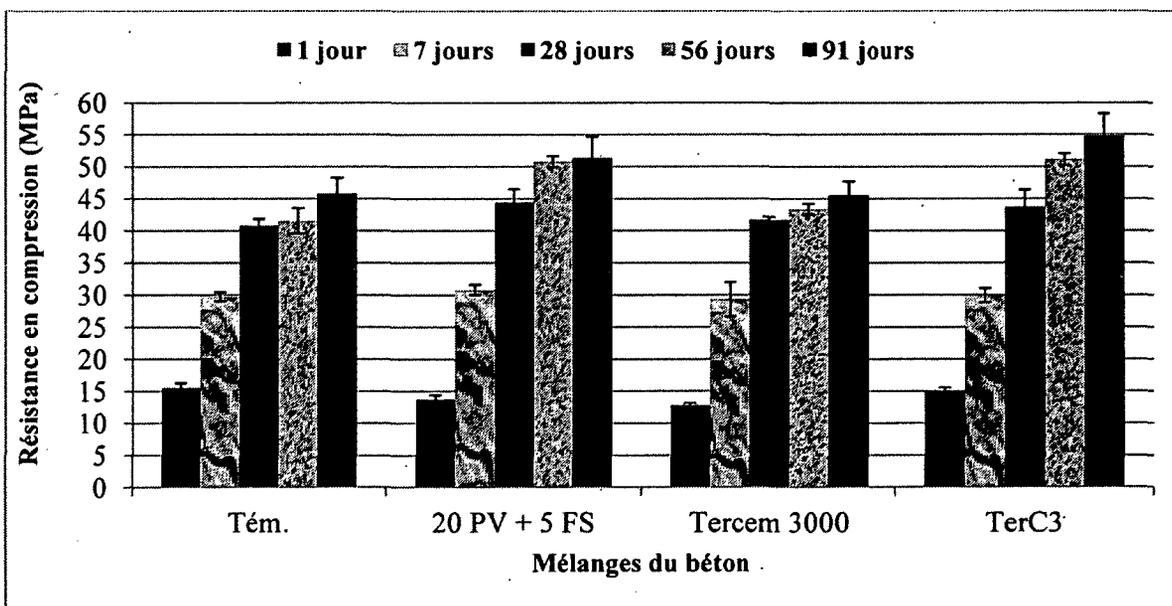


Figure 5-25: La résistance en compression pour les bétons ternaires

La figure 5-26 montre que les bétons ternaires développent des gains de résistance en compression plus importants que ceux du béton témoin à 56 et 91 jours. Les bétons proportionnés avec (20%PV+5%FS) et avec le ciment TerC3 engendrent des gains de résistance en compression semblables à 56 jours. Par contre, à l'âge de 91 jours, le béton incorporant le ciment TerC³ développe des gains de résistance en compression légèrement supérieurs à celui du béton formulé avec (20%PV+5%FS).

Les travaux effectués par [Laldji et al., 2010] sur des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,35 et contenant des ciments ternaires Tercem3000 et TerC³ ont montré également des gains importants de la résistance en compression entre 28 et 91 jours. Ce gain de résistance montre un effet synergique global entre le ciment portland, le laitier et la fumée de silice. Cet effet est également significatif dans le ciment composé à base des cendres volantes et de la fumée de silice.

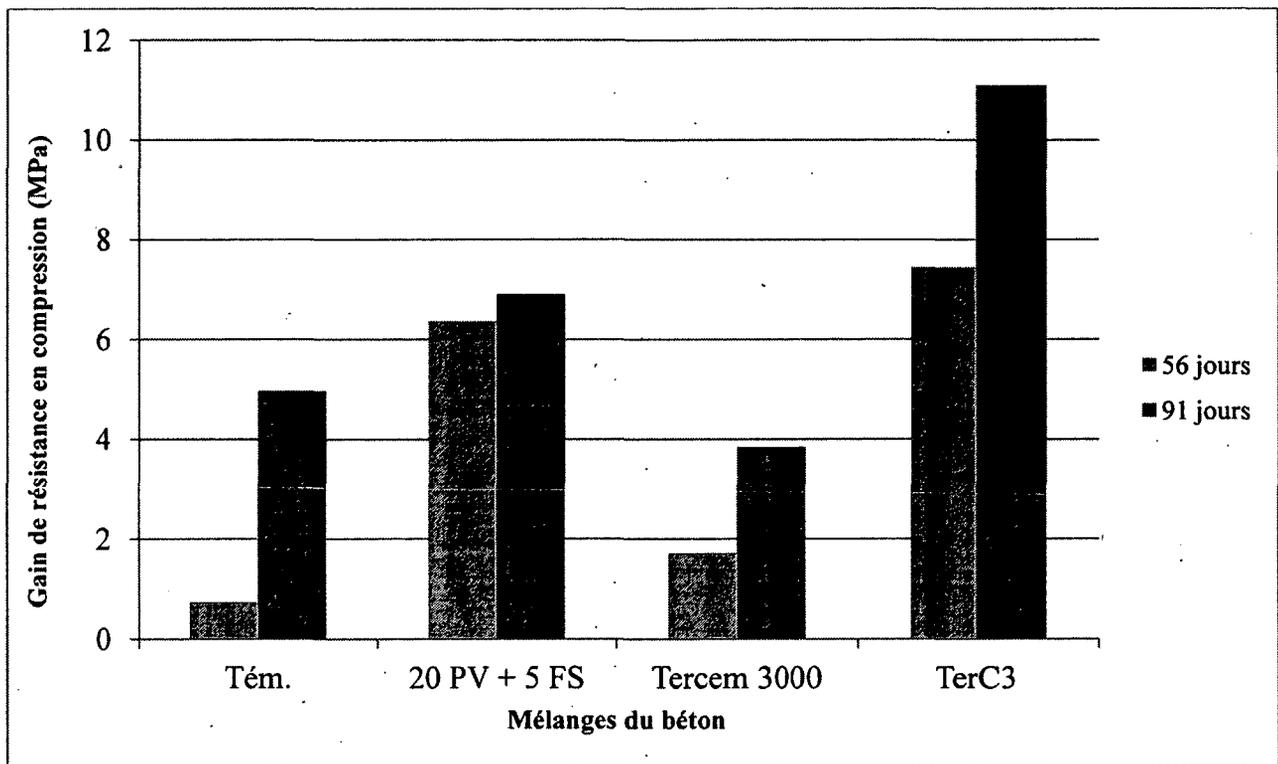


Figure 5-26: Le gain de résistance en compression pour les bétons ternaires par rapport à 28 jours

5.2.3 Résistance en traction

Plusieurs modèles empiriques existent pour estimer la résistance en traction pour les bétons binaires et ternaires. À un âge donné, la résistance en traction est estimée à partir de la résistance en compression. Les modèles (CSA) $F_t = 0,60\lambda\sqrt{F_c}$, (ACI) $F_t = 0,59 F_c^{0,55}$, (Euro) $F_t = 0,273 F_c^{0,667}$, (Carrasquillo, Nilson et Slate) $F_t = 0,54\sqrt{F_c}$ et (Ahmad et Shah) $F_t = 0,462 F_c^{0,55}$ (Ahmad et Shah) sont utilisés pour la

prédiction de la résistance en traction à 28 et 91 jours. En général, la relation (ACI) $F_t = 0,59 F_c^{0,55}$ donne une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales de la résistance en compression et celles de la résistance en traction. Cette relation donne une excellente prédiction pour la résistance en traction du béton témoin à 28 et 91 jours.

Dans le cas des bétons binaires et ternaires formulés avec de la poudre de verre, les valeurs mesurées de la résistance en traction sont inférieures aux valeurs prédites à 28 jours. Cette différence entre les valeurs mesurées et prédites de la résistance en traction à 28 jours peut être liée à la faible réactivité pouzzolanique de la poudre de verre à 28 jours. Cependant, à l'âge de 91 jours, cette relation donne une meilleure prédiction de la résistance en traction pour les bétons incorporant de la poudre de verre.

Dans le cas des bétons proportionnés avec les ciments ternaires TerC³ et Tercem3000, le modèle de l'ACI donne une bonne prédiction de la résistance en traction à 28 et 91 jours. Alors, pour les bétons formulés avec de la poudre de verre; le modèle de ACI n'est pas adéquat à 28 jours mais acceptable à long terme (91 jours).

Les résultats présentés dans la figure 5-27 montrent les valeurs mesurées et prédites de la résistance en traction pour les bétons binaires incorporant de la poudre de verre. Les bétons incorporant de la poudre de verre développent des résistances en traction inférieures d'au moins 1 MPa que celle du béton témoin à 28 jours, mais, des résistances en traction légèrement supérieures à celle du témoin à 91 jours. Cette tendance montre l'effet bénéfique de l'incorporation de la poudre de verre sur l'évolution de la résistance en traction à 91 jours. Cependant une étude menée par [Taha et al., 2008] sur des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,38 révèle que l'incorporation de 20% du verre n'a pas d'effet significatif sur le développement de la résistance en traction par rapport au béton témoin.

Une étude effectuée par [Uzal et al., 2007] sur des bétons binaires proportionnés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant respectivement 50% des cendres volantes (classe F) et 50% de laitier a montré également un gain significatif de la résistance en traction entre 28 et 91 jours. Le gain est lié à l'amélioration de la qualité de la zone de transition entre la pâte du ciment et les granulats à cause de la réactivité des ajouts utilisés.

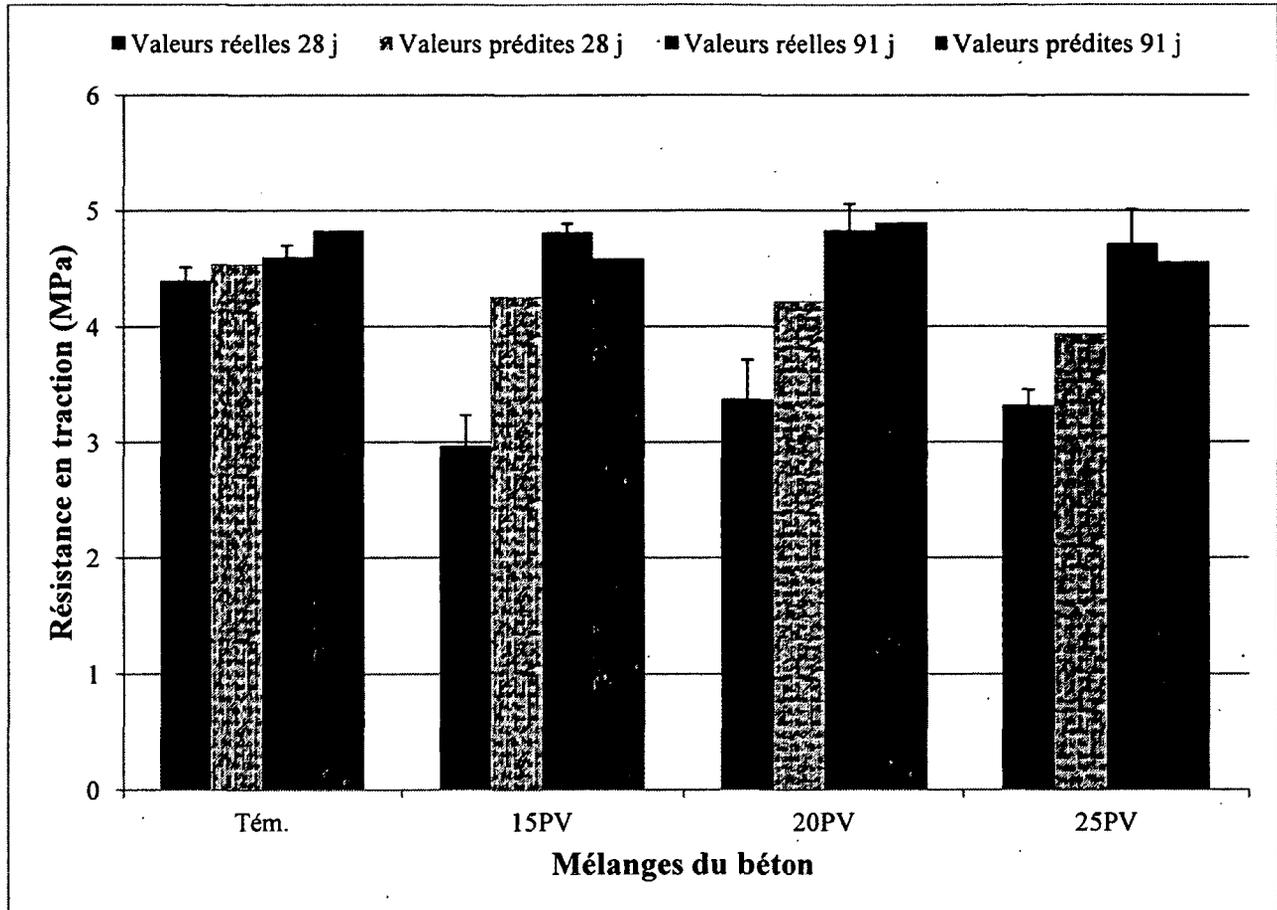


Figure 5-27: Les résistances en traction pour les bétons binaires

La figure 5-28 illustre les valeurs mesurées et prédites de la résistance en traction pour les bétons ternaires à 28 et 91 jours. Les bétons ternaires formulés avec les ciments Tercem3000 et TerC³ développent des résistances en traction légèrement supérieures à celle du témoin à 28 jours, tandis que le béton ternaire proportionné avec (20%PV+5%FS) développe une résistance en traction inférieure de 0,42 MPa à celle du béton témoin à 28 jours. Le gain de la résistance en traction entre 28 et 91 jours pour le témoin, le ternaire formulé avec TerC³ et le ternaire formulé avec Tercem3000 est respectivement de 0,21, 0,22 et 0,05 MPa. Ce développement de la résistance en traction entre 28 et 91 jours ne montre pas un gain significatif pour les mélanges formulés avec les ciments TerC3 et Tercem3000. Cependant, le béton ternaire proportionné avec (20%PV+5%FS) a un gain de résistance de 1,07 MPa entre 28 et 91 jours. Ce développement de la résistance en traction à 91 jours pour le ternaire formulé avec (20%PV+5%FS) semble être lié à la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre qui devient plus efficace à un âge plus avancé.

Pour conclure, les bétons formulés avec les ajouts cimentaires et les ciments ternaires développent des résistances en traction supérieures (ses différences allant de 0,12 à 0,64 MPa) à celle du témoin à l'âge de 91 jours. Cette tendance est en accord avec les résultats obtenus par [Aladdine, 2009] sur des mélanges binaires et ternaires formulés avec un rapport E/L de 0,55.

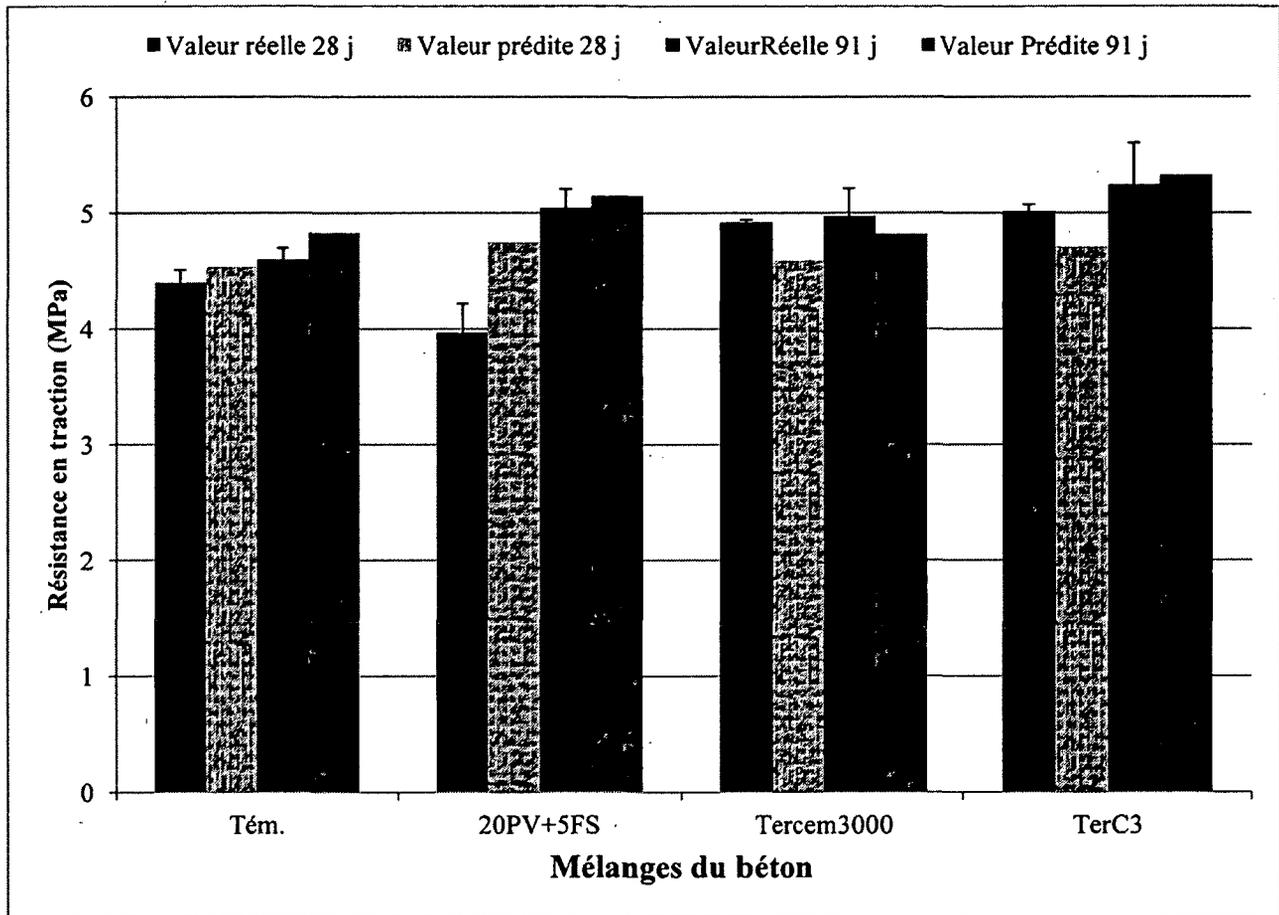


Figure 5-28: Résistance en traction pour les bétons ternaires

5.2.4 Résistance en flexion

Plusieurs modèles empiriques existent pour estimer la résistance en flexion pour les bétons binaires et ternaires. La résistance en flexion à un âge donné est estimée à partir de la résistance en compression. Les modèles (ACI) $F_i = 0,94\sqrt{F_c}$, (Burg et Ost) $F_i = 1,03 F_c^{0,50}$ et (Khayat et al.) $F_i = 0,23 + 0,12F_c - 0,000218(F_c)^2$ (Khayat et al.) sont utilisés pour estimer la résistance en flexion à 28 et 91 jours.

Parmi les modèles proposés, le modèle (ACI) $F_i = 0,94\sqrt{F_c}$ donne la meilleure corrélation entre les valeurs expérimentales de la résistance en compression et celles de la résistance en flexion. Par ailleurs, ce modèle ne donne pas une bonne estimation de la résistance en flexion pour le béton témoin à 28 et 91 jours. Le béton témoin subit une différence d'au moins 1 MPa entre les résistances en flexion mesurées et prédites par ce modèle à 28 et 91 jours.

Ce modèle donne une excellente prédiction de la résistance en flexion pour les bétons incorporant 15% et 20% de la poudre de verre à 28 jours. Il montre aussi une bonne prédiction de la résistance en flexion pour le béton incorporant 20% de la poudre de verre à 91 jours. Cependant, ce modèle donne une mauvaise estimation de la résistance en flexion pour le béton contenant 15% de la poudre de verre à 91 jours (une différence allant jusqu'à 2 MPa).

Dans le cas des bétons ternaires proportionnés avec (20%PV+5%FS), le ciment TerC³ et le ciment Tercem3000; le modèle de ACI donne une bonne prédiction de la résistance en flexion à 28 et 91 jours. Alors, ce modèle semble être acceptable pour l'estimation de la résistance en flexion à 28 et 91 jours des bétons ternaires et du béton binaire incorporant 20% de la poudre de verre.

La figure 5-29 présente les valeurs de la résistance en flexion mesurées et prédites pour les bétons binaires incorporant de la poudre de verre à 28 et à 91 jours. À l'âge de 28 jours, les bétons incorporant 15% et 20% de la poudre de verre développe des résistances en flexion qui dépassent légèrement celle du béton témoin. Cependant, le béton incorporant 25% de la PV a une résistance en flexion légèrement inférieure à celle du témoin. À un âge de 91 jours, les bétons incorporant 15%, 20% et 25% de la poudre de verre ont des résistances en flexion respectivement de 8,01, 6,80 et 7,03 MPa.

On peut conclure que le gain de la résistance en flexion en présence de la poudre de verre est important entre 28 et 91 jours. Ce gain peut être de 2,40 MPa dans le cas d'une teneur en poudre de verre de 15%. Ceci montre l'effet bénéfique de l'incorporation de la poudre de verre sur l'évolution de la résistance en flexion à 91 jours.

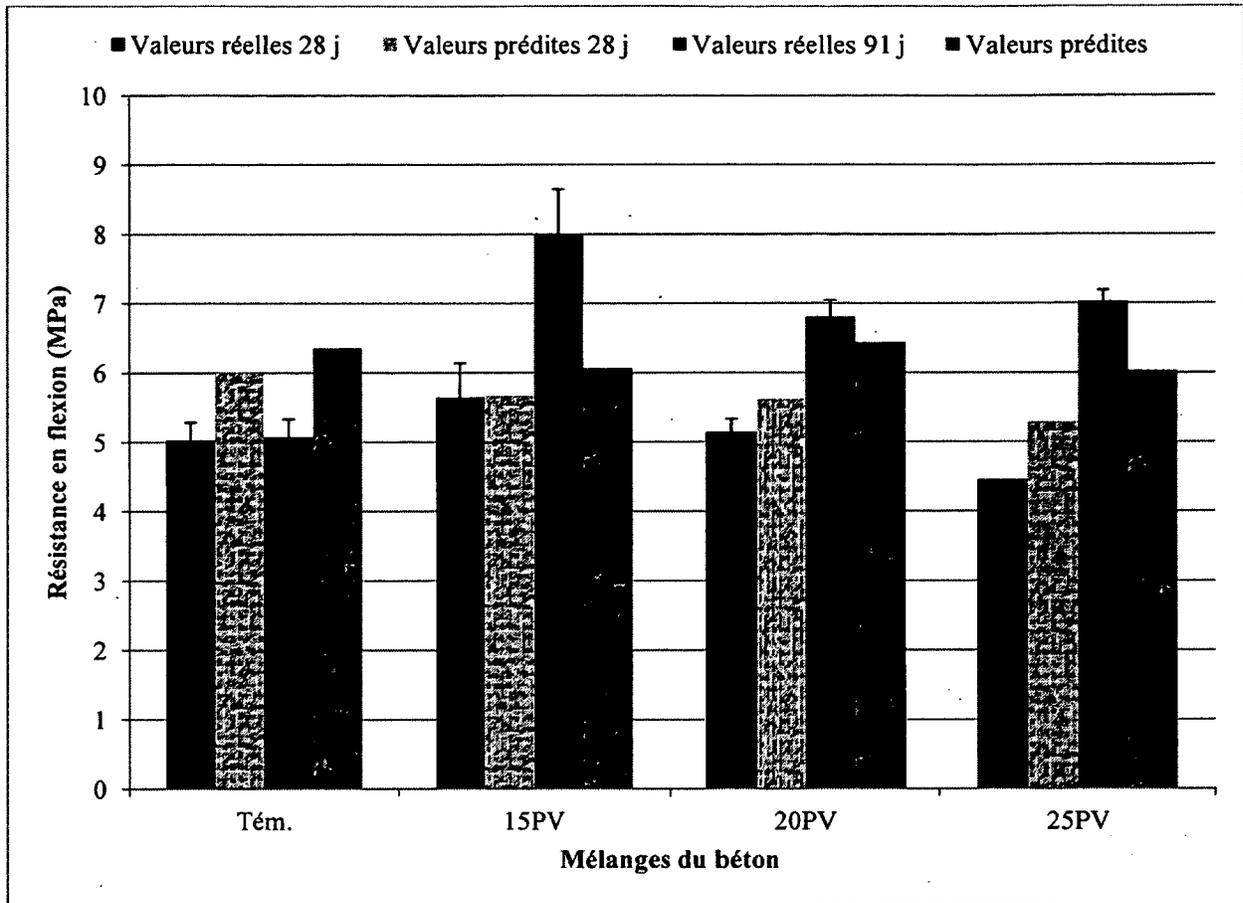


Figure 5-29: Résistance en flexion pour les bétons binaires

La figure 5-30 illustre les valeurs mesurées et prédites de la résistance en flexion pour les bétons ternaires à 28 et 91 jours. À un âge de 28 jours, les bétons ternaires développent des résistances en flexion supérieures d'au moins 1,50 MPa à celle du témoin. Cette augmentation de la résistance en flexion pour les bétons ternaires à 28 jours semble être liée à l'incorporation de la fumée de silice qui possède la tendance à augmenter la résistance en flexion à 28 jours. Les bétons formulés avec (20%PV+5%FS) et le ciment TerC³ développent des gains de résistance en flexion semblables entre 28 et 91 jours.

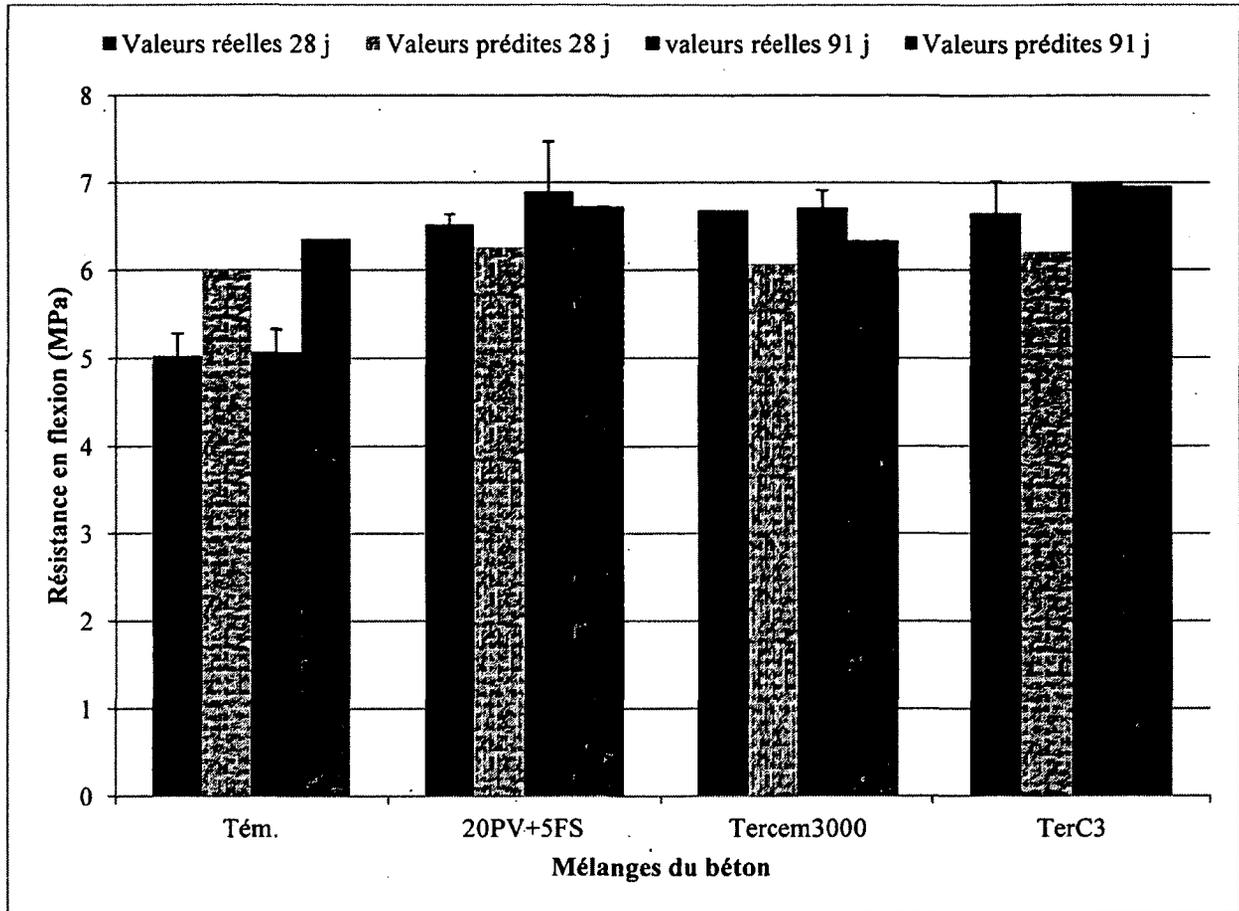


Figure 5-30: Résistance en flexion pour les bétons ternaires

5.2.5 Module d'élasticité

Plusieurs modèles empiriques existent pour estimer les valeurs de module d'élasticité à un âge donné à partir de la valeur mesurée de la résistance en compression. Les modèles (CAN A23.3-M84) $E_c = 5\sqrt{F_c}$, (Euro) $E_c = 9F_c^{0,3333}$, (Bael) $E_c = 11F_c^{0,3333}$ et (ACI) $E_c = 4,73\sqrt{F_c}$ sont utilisés pour la prédiction du module d'élasticité à 28 et 91 jours. Le modèle (Bael) $E_c = 11F_c^{0,3333}$ donne une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales de la résistance en compression et celle du module d'élasticité. Par ailleurs, ce modèle donne des modules d'élasticité supérieurs à ceux mesurés pour le béton témoin à 28 et 91 jours. Cette différence entre les valeurs prédites et mesurées pour le béton témoin est de 3 GPa.

Dans le cas des bétons incorporant 20% et 25% de la poudre de verre, le modèle (Bael) donne une très bonne prédiction du module d'élasticité à 28 et 91 jours. Le béton incorporant 15% de la poudre de verre développe des valeurs du module d'élasticité supérieures (allant jusqu'à 5 GPa) à celles prédites par le modèle à 28 et 91 jours. Dans le cas des bétons ternaires, le modèle Bael présente une très bonne prédiction des modules d'élasticité à 28 et 91 jours. En général, ce modèle est acceptable pour la prédiction des modules d'élasticité des bétons binaires et ternaires à 28 et 91 jours.

Les valeurs du module d'élasticité pour les bétons binaires incorporant de la poudre de verre sont présentées dans la figure 5-31. À l'âge de 28 jours, les modules d'élasticité pour les bétons incorporant 15%, 20% et 25% de la poudre de verre sont supérieurs à celui du béton témoin respectivement de 6,10, 3,00 et 0,56 GPa. À l'âge de 91 jours, les bétons incorporant 15%, 20% et 25% de la poudre de verre développent des modules d'élasticité respectivement de 43,1, 41,8 et 38,9 GPa, soit, 7, 5,7 et 2,8 GPa supérieurs à celui du béton témoin. Ces résultats révèlent un effet bénéfique de l'incorporation de la poudre de verre sur l'accroissement du module d'élasticité par rapport au béton témoin. Cet effet bénéfique cause le retard de l'apparition de la première fissure dans les bétons avec de la poudre de verre en appliquant une charge de compression.

Les valeurs mesurées et prédites du module d'élasticité à 28 et 91 jours pour les bétons ternaires sont présentées dans la figure 5-32. Les bétons ternaires développent également des valeurs de module d'élasticité supérieures à celui du béton témoin à 28 et 91 jours. Ces valeurs restent légèrement inférieures à celles des bétons incorporant 15% et 20% de la poudre de verre à 91 jours.

Des tableaux qui présentent le rapport entre les valeurs mesurées et celles estimées à partir de chaque formule empirique sont présentés dans l'annexe 2.

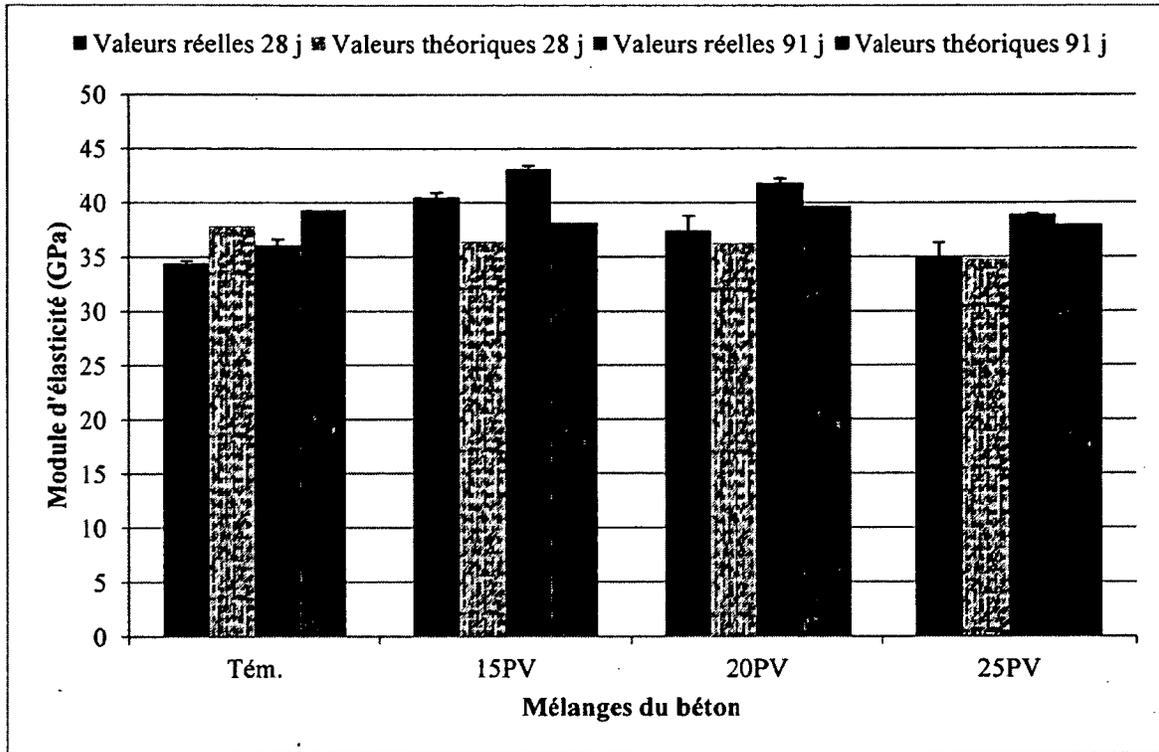


Figure 5-31: Le module d'élasticité des bétons binaires

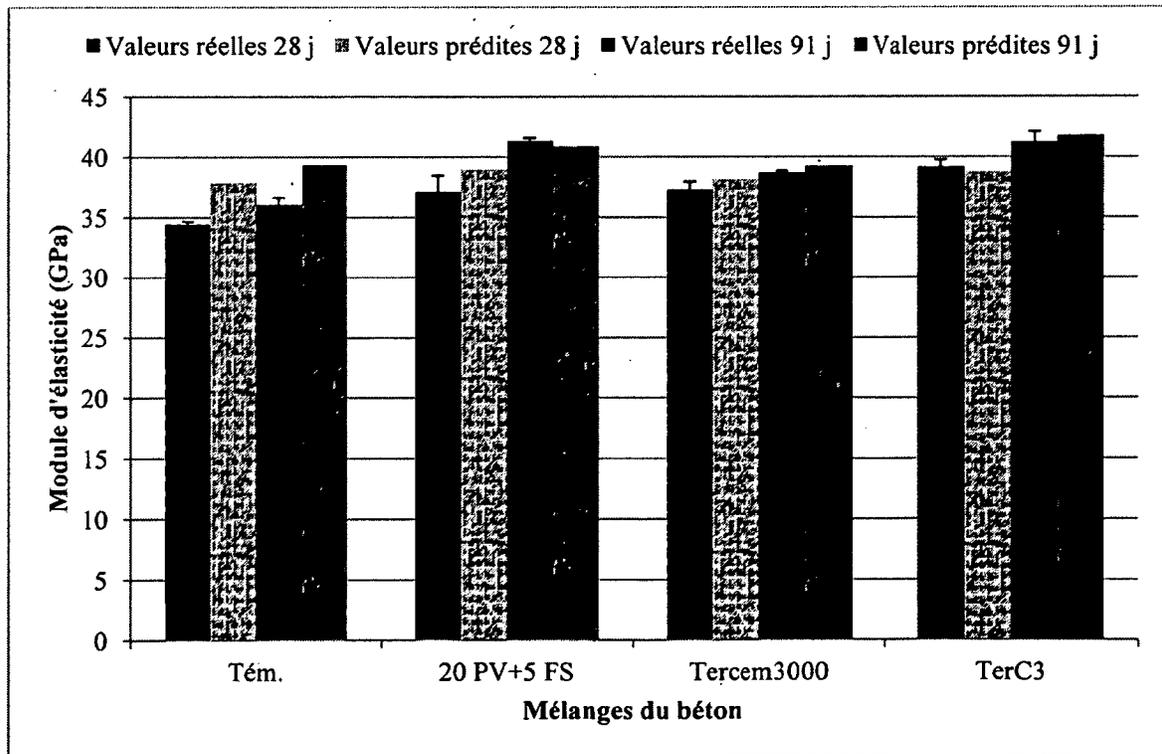


Figure 5-32: Le module d'élasticité des bétons ternaires

5.2.6 Perméabilité aux ions chlores

Les valeurs de la perméabilité aux ions chlores pour les bétons binaires incorporant de la poudre de verre sont présentées dans la figure 5-33. Les mélanges binaires incorporant de la poudre de verre entraînent des résistances contre la pénétration des ions chlores plus élevées que celle du témoin. Par exemple, à 28 jours, les bétons binaires proportionnés avec 15%, 20% et 25% de la poudre de verre présentent des perméabilités respectivement de l'ordre de 0,50, 0,51 et 0,53 fois celle du béton témoin. À l'âge de 56 jours, l'incorporation de 15% à 25% de la poudre de verre donnent des valeurs de perméabilité aux ions chlores inférieures à 1500 Coulombs. Cependant, le béton témoin développe une perméabilité aux ions chlores de 3330 Coulombs à 56 jours. À long terme (91 jours), les bétons incorporant 15%, 20% et 25% de la poudre de verre présentent des perméabilités aux ions chlores respectivement de l'ordre de 0,35, 0,24 et 0,23 fois celle du béton témoin. Ces résultats montrent que plus le taux d'incorporation de la poudre de verre augmente, plus le béton est imperméable à 56 et 91 jours.

Selon la classification donnée dans la norme ASTM C1202, les bétons binaires contenant de la poudre de verre présentent une perméabilité aux ions chlores modérée tandis que le béton témoin présente une perméabilité élevée à 28 jours. Cependant, à long terme (91 jours); les bétons formulés avec 20% et 25% de la poudre de verre présentent une perméabilité très faible tandis que celui incorporant 15% du verre présente une perméabilité aux ions chlores faible selon la norme ASTM C1202. La perméabilité aux ions chlores du béton témoin demeure modérée à 91 jours selon la classification dans la norme ASTM C1202. Ceci montre l'effet bénéfique de l'incorporation de la poudre de verre sur l'augmentation de la résistance du béton contre la pénétration des agents potentiellement agressifs. Les travaux effectués par [Neithalath, 2011] sur des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% de la poudre de verre ont illustré également la réduction significative de la perméabilité aux ions chlores en présence de la poudre de verre.

Les perméabilités aux ions chlores à 28, 56 et 91 jours des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant de (15% à 25%) de la poudre verre sont en accord avec les résultats estimés à partir des modèles statistiques établis dans la phase 1 de cette étude.

Cette réduction de la perméabilité aux ions chlores en présence de la poudre de verre est due principalement à sa réaction pouzzolanique qui rend la matrice imperméable contre la pénétration des agents agressifs par la production d'un gel plus dense de C-S-H. Cette réaction pouzzolanique favorise la discontinuité des pores capillaires et réduit d'avantage la porosité du béton ce qui bloque le transport des ions chlores [Patagundi et al., 2008; Zidol, 2009].

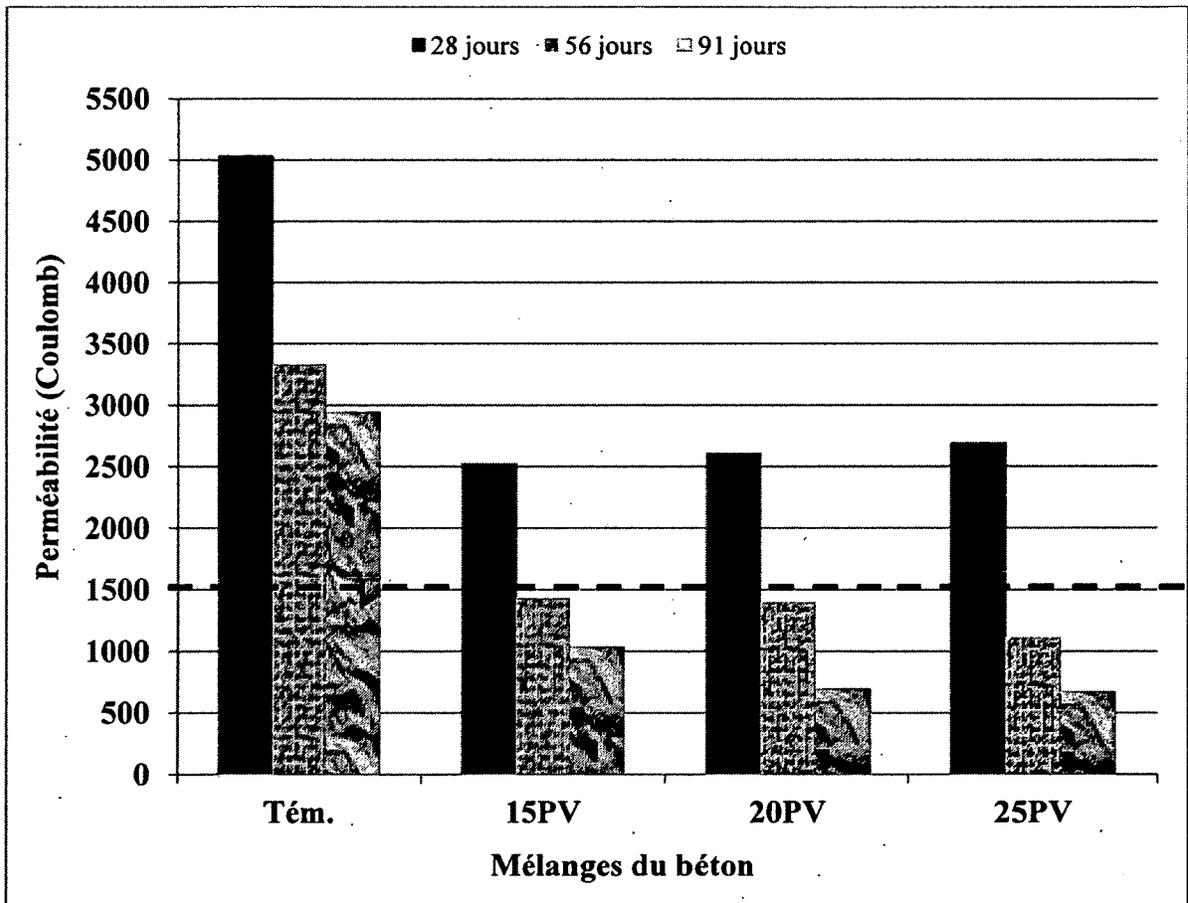


Figure 5-33: La charge totale (Coulombs) passée à travers les bétons binaires

Les valeurs de la perméabilité aux ions chlores pour les bétons ternaires sont présentées dans la figure 5-34. À 28 jours, la perméabilité la plus faible (950 Coulombs) est obtenue avec le béton ternaire proportionné avec le ciment Tercem3000. Les bétons ternaires proportionnés avec (20%PV+5%FS) et TerC3 présentent respectivement des perméabilités aux ions chlores de 1767 et 1140 Coulombs à 28 jours. Entre 28 et 56 jours, la valeur de la perméabilité aux ions chlores diminue respectivement de 278 et 474 Coulombs pour les bétons formulés avec les ciments Tercem3000 et TerC³. Cependant, le béton proportionné avec (20%PV + 5%FS) donne une baisse de perméabilité aux ions chlores de 1116

Coulombs entre 28 et 56 jours. Ceci montre qu'il y a une synergie entre la poudre de verre et la fumée de silice qui cause la réduction de la perméabilité aux ions chlorés à 56 jours. En effet, les bétons ternaires présentés dans la figure 5-34 donnent des perméabilités aux ions chlorés semblables à 56 jours. À long terme (91 jours), les bétons formulés avec (20%PV+5%FS) et le ciment (Tercem3000) entraînent des perméabilités aux ions chlorés semblables. Cependant, le béton proportionné avec le ciment (TerC³) donne une perméabilité légèrement inférieure à celle obtenue par le béton formulé avec (20%PV+5%FS) à 91 jours.

Des résultats semblables ont été observés par [Bouzoubâa et al., 2004] sur des bétons ternaires formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% des cendres volantes (classe F) et 4% de la fumée de silice après 28 et 120 jours de mûrissement. Cette réduction de la perméabilité est liée à l'effet synergique de ces deux ajouts cimentaires sur la perméabilité. En effet, la fumée de silice diminue la perméabilité à 28 jours tandis que les cendres volantes la diminuent à un âge plus avancé ce qui apporte une perméabilité très faible à 28 et à 120 jours.

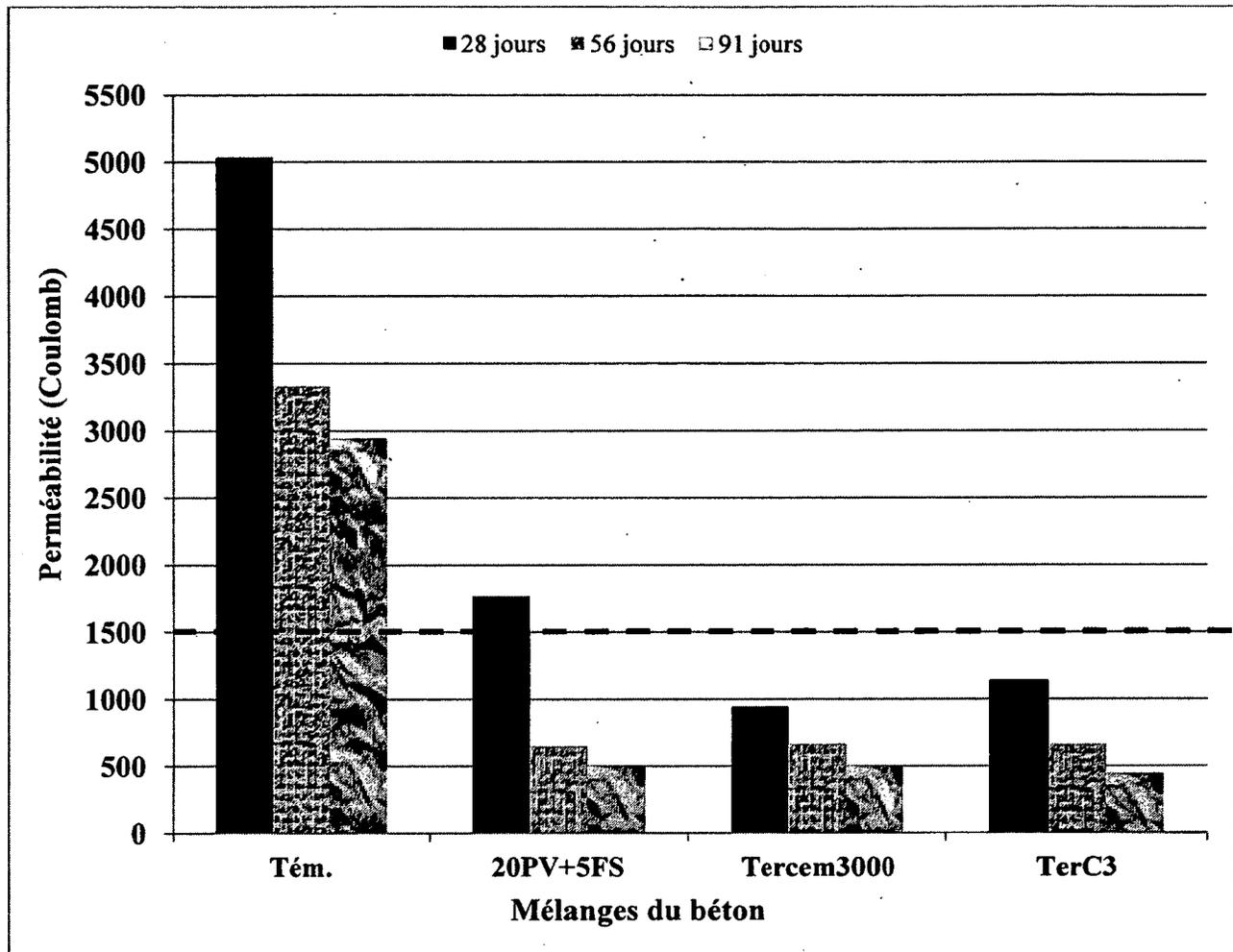


Figure 5-34: La charge totale (Coulombs) passée à travers les bétons ternaires

5.2.7 Résistances aux cycles de gel-dégel

Les caractéristiques du réseau des bulles d'air obtenues dans les bétons durcis ainsi que les facteurs de durabilité sont présentés dans le tableau 5-22.

Tableau 5.22: caractéristiques du réseau des bulles d'air et les facteurs de durabilité

Caractéristiques	Mélanges						
	Témoin	15PV	20PV	25PV	20PV+5FS	Tercem3000	TerC3
Volume d'air, état frais (%)	7,8	5,2	5,3	8,0	5,4	7,3	5,0
Volume d'air, état durci (%)	3,9	1,8	2,6	3,0	3,0	3,8	1,8
Surface spécifique (1/mm)	21,3	24,8	16,9	19,1	19,1	17,7	11,4
Facteur d'espacement L^{-} (μm)	269	321	297	338	338	329	525
Facteur de durabilité (%)	101	100	104	98	98	103	105

La perte d'air à l'état durci varie de 2,7% à 5% pour tous les bétons étudiés. Le facteur d'espacement pour chaque mélange est supérieur à 230 μm qui est la limite maximale dans la norme CSA A23.1 pour un béton avec E/L supérieur à 0,36 exposé au gel-dégel avec ou sans sels déglaçant. La surface spécifique des bulles d'air est inférieure à 25 (1/mm). Ces résultats ne reflètent pas les bonnes caractéristiques du réseau des bulles d'air généralement recommandés pour assurer une bonne durabilité face aux cycles de gel-dégel.

Les facteurs de durabilité pour tous les bétons varient entre 98% et 105%. Ces valeurs dépassent largement la limite inférieure de 60% recommandée par la norme ASTM C666. L'incorporation de la poudre de verre offre au béton de très bons facteurs de durabilité malgré un mûrissement de 14 jours seulement, tel que recommandé par la norme ASTM C666. Alors, 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 (L^{-}_{crit}).

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par [Zidol, 2009] sur des bétons formulés avec E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre.

5.2.8 Résistance à l'écaillage

La résistance à l'écaillage du béton est évaluée quantitativement par la mesure de la perte de masse de la surface écaillée et qualitativement par une évaluation visuelle de l'état de caractéristiques de surface des échantillons. Les valeurs de la masse écaillée pour les mélanges témoin, binaires et ternaires ainsi que l'aspect visuel pour ces bétons sont présentés au tableau 5-23 après être exposés à 56 cycles de gel-dégel en présence des sels de déglaçage. Seulement le témoin qui montre un écaillage très léger des mortiers

de surface avec l'absence des cratères. Tandis que les bétons binaires et ternaires possèdent un écaillage important des mortiers de surface avec l'absence de cratères après être exposés à 56 cycles de gel-dégel en présence des sels de déglacage.

Tableau 5.23: Résistance des bétons exposés à l'écaillage (BNQ2621-900)

Caractéristiques	Mélanges						
	Témoin	15PV	20PV	25PV	20PV+5FS	Tercem3000	TerC3
Masse écaillée (gm/m ²)	147	916	2018	1474	1084	833	1236
Code visuel	1a	1b	1b	1b	1b	1b	1b

La perte de masse pour les bétons binaires incorporant de la poudre de verre après être exposés à 56 cycles de gel-dégel est présentée dans la figure 5-35. Les bétons binaires contenant 15%, 20% et 25% de la poudre de verre entraînent des pertes de masse respectivement de 916, 2018 et 1474 gm/m² soit 416, 1518 et 974 gm/m² supérieure à la limite maximale de 500 gm/m² recommandée par la norme BNQ 2621-900. Cependant, le béton témoin engendre une perte de masse de 147 gm/m² après 56 cycles de gel-dégel. Ces résultats ne reflètent pas une bonne performance des bétons avec du verre confectionnés avec un rapport E/L de 0,45 face aux cycles de gel-dégel en présence des sels déglacant. Le béton incorporant 20% de poudre de verre a la perte de masse la plus importante parmi les bétons évalués. Cette perte a augmenté brusquement à partir du trente cinquième cycle de gel-dégel. Elle est due peut-être à des problèmes de fonctionnement de la chambre de l'écaillage. Elle peut être liée aussi à la porosité élevée de la surface du béton qui favorise la formation d'une plus grande quantité de glace. Des résultats semblables sont obtenus par [Aladdine, 2009] sur un mélange formulé avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% de la poudre de verre. Par contre, les résultats obtenus par [Zidol, 2009] sur des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre révèlent qu'ils ont une résistance à l'écaillage similaire à celle du béton témoin. Cela montre l'effet significatif de la réduction du rapport E/L sur l'accroissement de la résistance à l'écaillage pour des bétons incorporant de la poudre de verre.

En effet, [Pigeon et al., 1996] ont observé des pertes de masse importantes sur des mélanges proportionnés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 40% des cendres volantes. L'augmentation de la masse écaillée dans les mélanges contenant des cendres volantes est due principalement à la présence d'une couche mince sur la surface du béton. Cette couche est extrêmement

poreuse avec un rapport E/L élevé ce qui entraîne une réduction significative de la résistance à l'écaillage. Par conséquent, l'incorporation des cendres volantes tend à augmenter l'épaisseur de cette couche extrêmement poreuse. Des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,33 et contenant 58% des cendres volantes démontrent une mauvaise performance face aux cycles de gel-dégel en présence des sels déglacant, ce qui montre l'effet négatif de l'utilisation des cendres volantes sur la résistance à l'écaillage [Bilodeau et al., 1994].

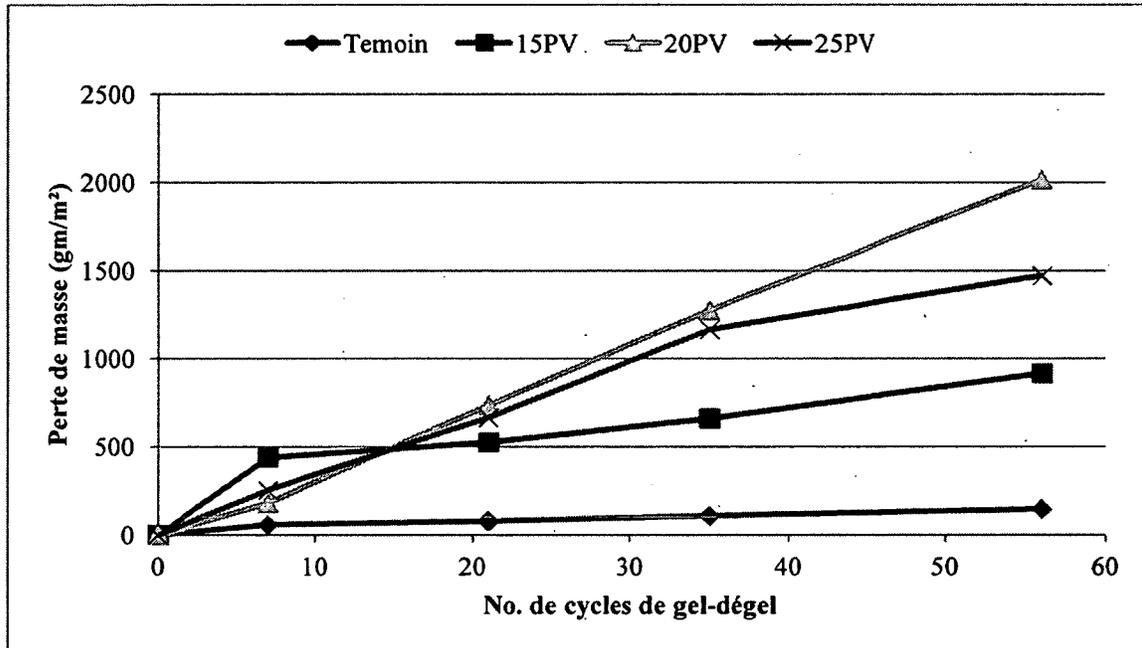


Figure 5-35: Masse écaillée après 56 cycles de gel-dégel pour les bétons binaires

La perte de masse pour les bétons ternaires après être exposés à 56 cycles de gel-dégel est présentée dans la figure 5-36. Les bétons ternaires formulés avec (20%PV+5%FS), Tercem3000 et TerC3 engendrent des pertes de masse respectivement de 1084, 833 et 1236 gm/m², soit 584, 333 et 736 gm/m² supérieure à la limite maximale de 500 gm/m² recommandée par la norme BNQ 2621-900. Ces résultats ne reflètent pas des bonnes résistances à l'écaillage. Le ternaire formulé avec Tercem3000 a une perte de masse plus faible que les autres mélanges ternaires et les mélanges binaires, mais elle reste encore plus importante que celle du témoin. Le béton proportionné avec (20%PV+5%FS) donne une perte de masse légèrement inférieure à celle du ternaire incorporant le ciment TerC³. [Aladdine, 2009] a précisé que la résistance à l'écaillage augmente pour les bétons ternaires incorporant de la poudre de verre en abaissant

le rapport E/L à 0,40 et son écaillage de surface est très léger selon la classification donnée par la norme ASTM C672.

[Bouzoubâa et al., 2011] ont constaté qu'un béton formulé avec un rapport E/L de 0,42 et incorporant un ciment composé des cendres volantes et de la fumée de silice a une faible résistance contre l'écaillage. Il provoque une perte de masse de 1500 gm/m² après être exposé à 56 cycles de gel-dégel. Le béton ternaire proportionné avec un rapport E/L de 0,42 et incorporant 25% de laitier et 10% des cendres volantes montre une perte de masse de 1400 gm/m², soit 600 gm/m² supérieure à la limite maximale de 800 gm/m² recommandée par la norme MTO LS 412 [Boyd et al., 2007] .

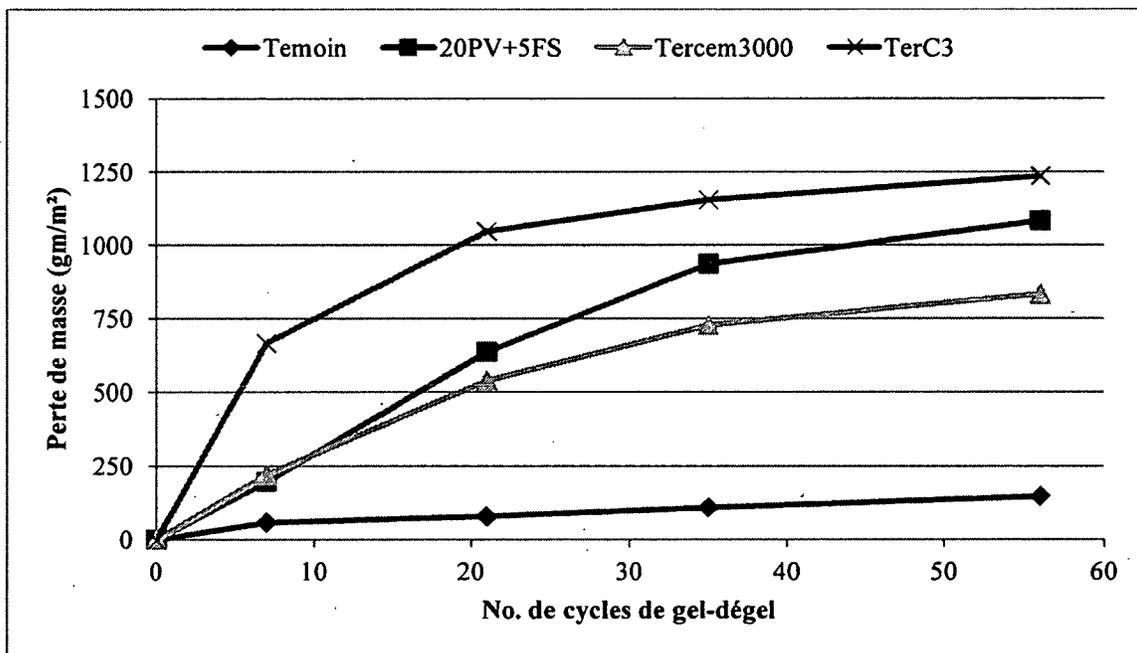


Figure 5-36: Masse écaillée après 56 cycles de gel-dégel pour les bétons ternaires

5.2.9 Retrait au séchage

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique parce qu'il entraîne souvent l'apparition des fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton. Les figures 5-37 et 5-38 montrent les valeurs de retrait au séchage mesurées sur les bétons binaires et ternaires conformément à la norme ASTM C157. Tous les bétons ont un léger gonflement entre 1 jour et 28 jours. Ce gonflement est causé

par l'absorption de l'eau lors du mûrissement dans l'eau. Le béton témoin montre un gonflement supérieur à celui d'autres bétons qui est dû probablement à sa porosité élevée par rapport aux bétons proportionnés avec la poudre de verre et les ciments ternaires.

À l'âge de 84 jours, les bétons incorporant de la poudre de verre ont des valeurs de retrait au séchage supérieures à celle du témoin. Le béton ternaire formulé avec Tercem3000 montre un retrait légèrement inférieur à celui du témoin. Les valeurs de retrait pour les bétons ternaires et le béton formulé avec 25% de la poudre de verre commencent à se stabiliser à partir de 84 jours. Cependant, le béton incorporant 20% de la poudre de verre a le retrait le plus élevé à 84 et 140 jours parmi les différents bétons évalués.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par [Shayan et al., 2006] sur des bétons formulés avec E/L de 0,49 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre.

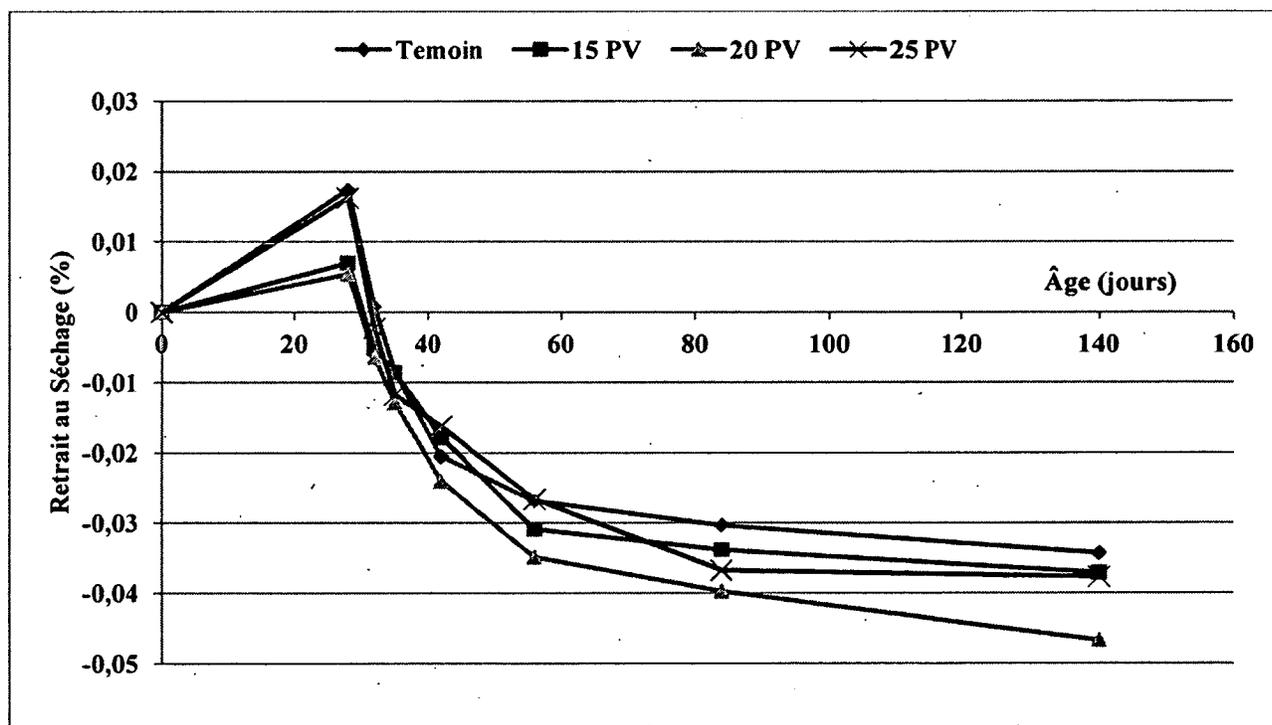


Figure 5-37: Retrait au séchage des bétons binaires

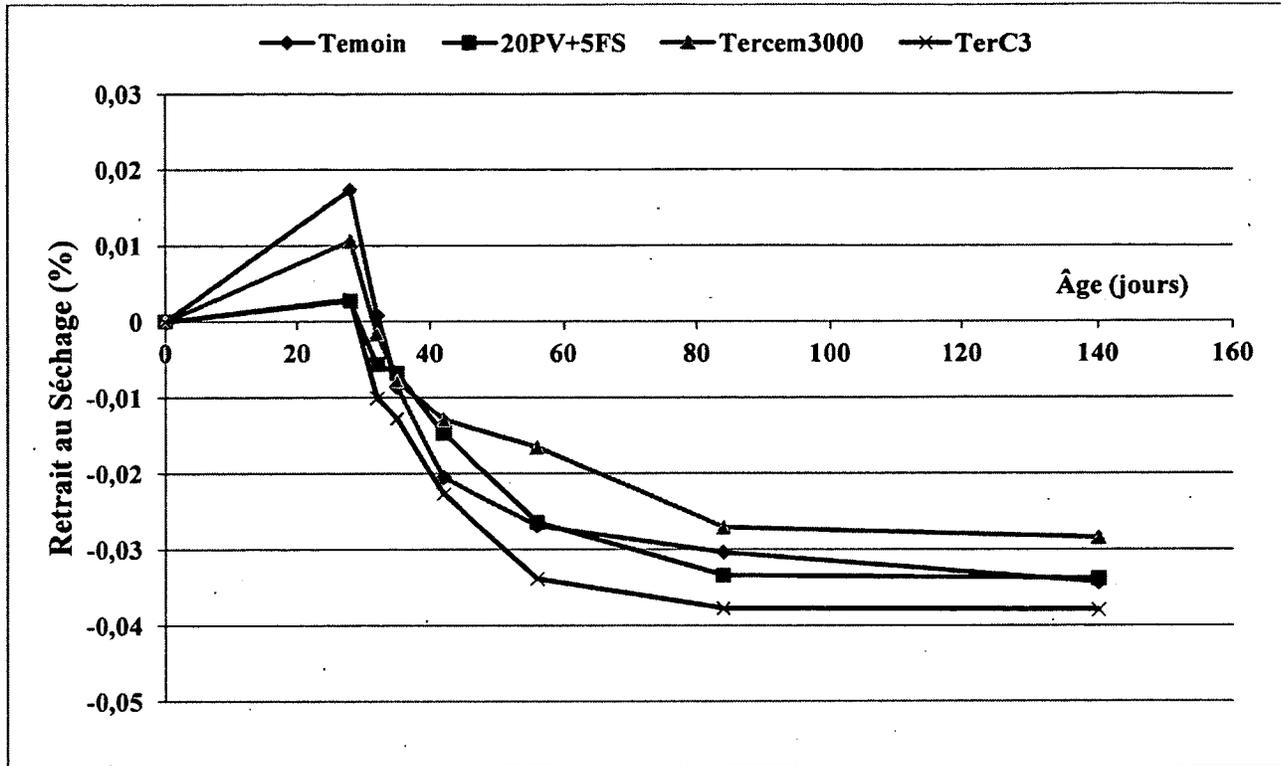


Figure 5-38: Retrait au séchage des bétons ternaires

5.2.10 Optimisation économique des mélanges

Le coût unitaire des mélanges du béton contenant de la poudre de verre est présenté dans la figure 5-39. Le prix unitaire de la poudre de verre est présenté selon cinq prix de la poudre de verre soit, 50, 100, 150, 200 et 250 \$ /t. Le coût unitaire du béton proportionné avec 100% du ciment portland est 85 \$/m³. Pour un prix de la PV de 50 \$/t, les bétons binaires et ternaires formulés avec du verre possèdent un coût unitaire inférieur à celui du témoin. Dans le cas du prix de la PV de 100 \$/t, le béton ternaire a un coût unitaire légèrement supérieur à celui du béton témoin. Le coût élevé de la fumée de silice (350 \$/t) entraîne une augmentation du prix unitaire du béton ternaire formulé avec (20%PV+5%FS) par rapport aux bétons incorporant seulement de la poudre de verre.

Alors, l'accroissement du coût unitaire de la poudre de verre provoque une augmentation du prix des mélanges incorporant de la PV par rapport au témoin.

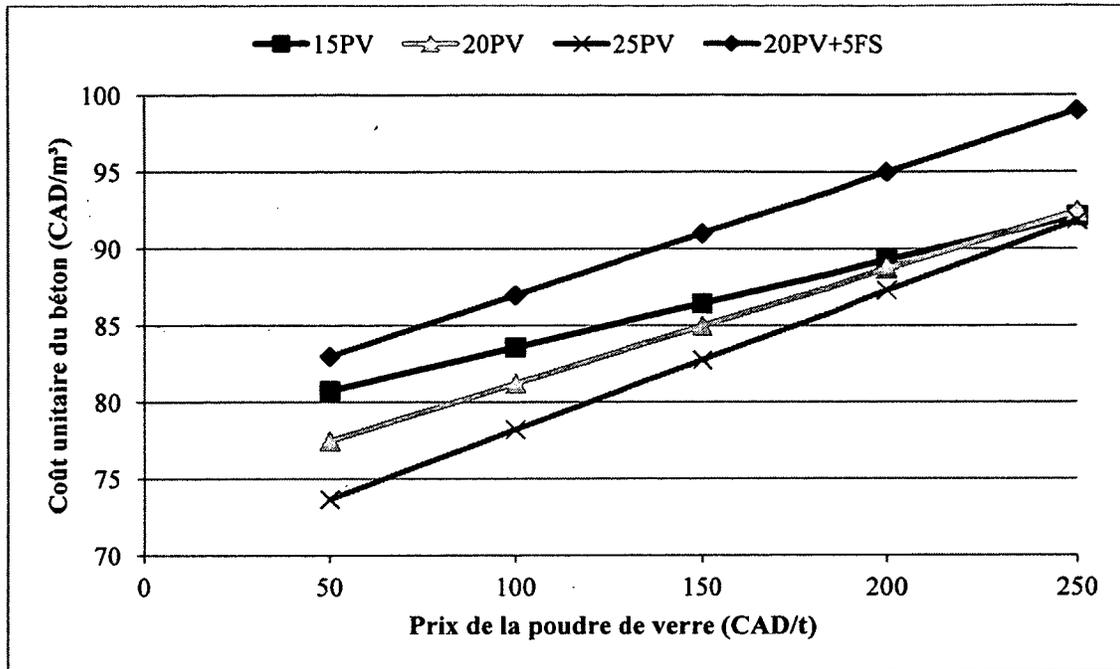


Figure 5-39: Le coût unitaire des mélanges incorporant du verre

Les coûts unitaires des ciments ternaires Tercem3000 et TerC3 sont respectivement de 227 et 215 \$/t. Alors, les ternaires formulés avec ces deux types de ciment ont un coût unitaire respectivement de 110 et 107 \$/m³ soit, 11 et 8 \$/m³ supérieur à celui de (20%PV+5%FS) ayant un prix unitaire de la poudre de verre de 250 \$/t. Donc, quel que soit le prix unitaire de la poudre de verre utilisé dans cette étude, les bétons binaires et ternaires incorporant de la poudre de verre entraînent des prix plus faibles que ceux des ternaires proportionnés avec les ciments Tercem3000 et TerC³.

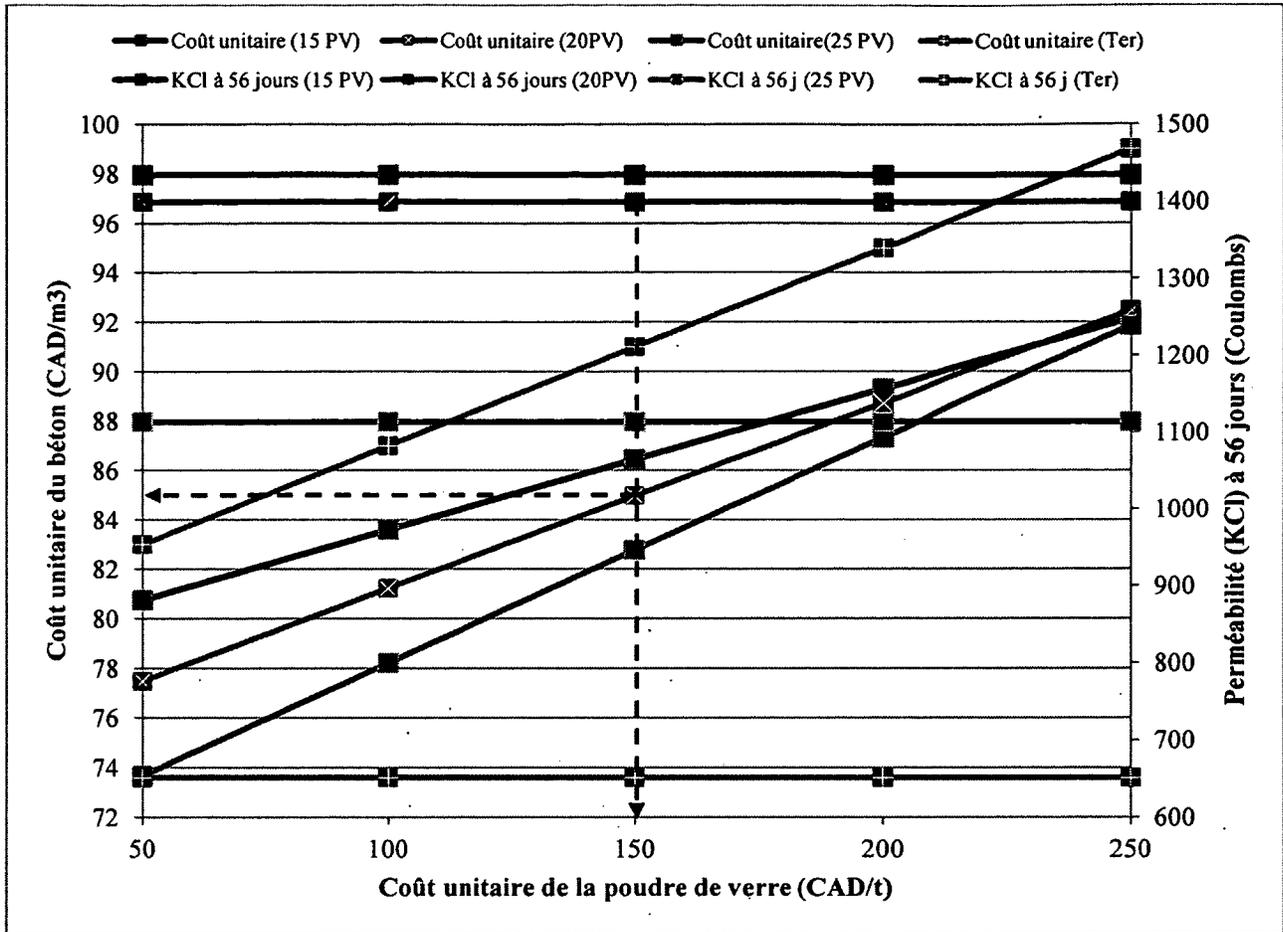


Figure 5-40: Relation entre la perméabilité aux ions chlores à 56 jours et le coût unitaire pour des bétons formulés avec du verre

La figure 5-40 présente la relation entre la perméabilité aux ions chlores à 56 jours et le coût unitaire du béton. Pour un prix unitaire de la poudre de verre de 150 \$/t, le mélange binaire proportionné avec 20%PV affiche une perméabilité de 1400 Coulombs à 56 jours et son coût unitaire est 85 \$/m³. Cependant, le béton témoin a une perméabilité de 3334 Coulombs et son coût unitaire est 85 \$/ m³. Alors, l'incorporation de 20% de poudre de verre provoque une diminution significative de la perméabilité aux ions chlores à 56 jours par rapport au témoin. Ce taux d'incorporation ne provoque pas une augmentation du coût unitaire par rapport à celui du béton témoin.

5.2.11 Conclusions des résultats de la phase 2

- Pour un dosage en agent réducteur d'eau (ARE) fixe, les bétons binaires contenant de la poudre de verre occasionnent des valeurs d'affaissement inférieures à celle du témoin après 10 minutes du contact eau-liant. Cependant, les bétons ternaires requièrent eux aussi des dosages en ARE supérieurs à celui du témoin pour avoir un affaissement de $80\text{mm} \pm 30\text{mm}$ après 10 minutes du contact eau -liant. Cet accroissement de dosage en ARE est lié à la finesse des ajouts utilisés dans les bétons composés.
- Pour avoir une teneur en air entre 5% et 8%, l'augmentation de taux d'incorporation de la poudre de verre entraîne une légère augmentation du dosage en agent entraîneur d'air (AEA) dans les bétons binaires. Les bétons ternaires requièrent des dosages en AEA plus élevés que celui du béton témoin.
- Le béton binaire incorporant 20% de la poudre de verre engendre une résistance en compression similaires à celle du béton témoin à 56 jours et la dépasse légèrement à 91 jours. Tandis que, les bétons binaires formulés avec 15% et 25% de la poudre de verre possèdent des résistances en compression respectivement de l'ordre de 0,91 et 0,90 fois celle du béton formulé avec 100% du ciment portland. Alors, un taux de remplacement du ciment par la poudre de verre de 20% semble être optimal au point de vue de la résistance.
- Les bétons ternaires engendrent des résistances en compression similaire à celle du béton témoin à l'âge de 7 jours, tandis qu'elles sont plus élevées que celle du béton témoin à partir de 28 jours. Mais, le béton ternaire formulé avec Tercem3000 entraîne une résistance en compression similaire à celle du témoin à 91 jours. Ces résultats reflètent l'effet bénéfique de l'incorporation de la fumée de silice dans les bétons ternaires sur l'augmentation de la résistance en compression à jeune âge.
- Les bétons binaires et ternaires présentent des gains de résistance en compression plus importants que celui du témoin à 56 et 91 jours.
- Pour les bétons incorporant de la poudre de verre, le modèle de l'ACI pour la prédiction de la résistance en traction n'est pas adéquat à 28 jours mais acceptable à long terme (91 jours).
- Les bétons binaires engendrent des valeurs de résistance en traction inférieures à celle du béton témoin à 28 jours tandis qu'elles sont légèrement supérieures à celle du béton témoin à 91 jours.

Ces résultats montrent des gains de résistance en traction importants pour les bétons avec de la poudre de verre entre 28 et 91 jours.

- Les bétons ternaires composés de Tercem3000 et TerC³ entraînent des résistances en traction supérieures à celle du témoin à 28 et 91 jours. Cependant, le béton ternaire composé de (20%PV+5%FS) possède une résistance légèrement inférieure à celle du témoin à 28 jours, tandis qu'elle la dépasse à 91 jours. Ces résultats reflètent l'effet bénéfique de la poudre de verre sur l'augmentation de la résistance en traction à 91 jours.
- Pour le béton incorporant 20% de la poudre de verre, le modèle de l'ACI montre une bonne prédiction de la résistance en flexion à 28 et 91 jours. Ce modèle donne aussi une bonne prédiction pour les bétons ternaires à 28 et 91 jours.
- Les bétons binaires incorporant 15% et 20% de la poudre de verre engendrent des résistances en flexion légèrement supérieures à celle du béton témoin à 28 jours tandis que le béton binaire avec 25% de la poudre de verre entraîne une résistance inférieure à celle du témoin à 28 jours. Le gain de la résistance en flexion est significatif pour les bétons binaires avec de la poudre de verre entre 28 et 91 jours. Alors, les bétons binaires incorporant de la poudre de verre entraînent des résistances en flexion supérieures à celle du béton témoin à 91 jours.
- Les bétons ternaires engendrent des résistances en flexion supérieures à celle du béton témoin à 28 et 91 jours.
- Le modèle Bael donne une bonne prédiction des modules d'élasticité pour les bétons binaires et ternaires à 28 et 91 jours.
- Les bétons binaires et ternaires engendrent des modules d'élasticités supérieures à celui du témoin à 28 et 91 jours.
- Les bétons binaires possèdent des perméabilités aux ions chlorés moyennes à 28 jours selon la classification donnée par la norme ASTM C1202. Tandis qu'ils engendrent des pénétrabilités inférieures à 1500 Coulombs à 56 jours. Alors, l'incorporation de la poudre de verre a des effets significatifs sur la diminution de la charge totale passée par rapport au béton composé du ciment portland seulement.
- Le béton ternaire formulé avec (20%PV+5%FS) entraîne une perte significative de la perméabilité entre 28 et 56 jours. Cette perte est due à la réactivité pouzzolanique de la poudre de

verre assez efficace entre 28 et 56 jours. Tous les bétons ternaires provoquent des perméabilités inférieures à 1000 Coulombs à partir de 56 jours.

- Malgré les mauvaises caractéristiques du réseau des bulles d'air, tous les bétons possèdent des facteurs de durabilité entre 98% et 105%, ce qui reflète une excellente performance de ces bétons face aux cycles de gel-dégel.
- Contrairement au béton témoin, les bétons binaires et ternaires entraînent des pertes de masse supérieures à 500 gm/m² (limite maximale recommandée par la norme BNQ 2621-900). Ces résultats montrent l'effet négatif de la poudre de verre sur la résistance à l'écaillage des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45.
- Les bétons binaires et ternaires incorporant de la poudre de verre engendrent des valeurs de retrait au séchage supérieures à celle du béton témoin à 84 et 140 jours. Cependant, le ternaire composé de Tercem3000 entraîne des valeurs de retrait inférieures à celle du témoin à partir de l'âge de 42 jours.
- Les bétons ternaires composés des ciments Tercem3000 et TerC³ possèdent des coûts unitaires plus élevés que ceux des bétons binaires et ternaires incorporant de la poudre de verre quelque soit le prix de la poudre de verre étudié.
- L'utilisation de la poudre de verre au béton représente une avenue intéressante pour produire des bétons à la fois durables et économiques.

Conclusions et Recommandations

Phase 1

- Les modèles statistiques sont validés par des bétons ayant des formulations qui se trouvent à l'intérieure du domaine statistique.
- Tous les modèles statistiques obtenus sont valides pour des bétons proportionnés avec des rapports E/L de 0,35 à 0,60, des taux d'incorporation de la poudre de verre de 10% à 40% et des dosages en liant de 335 kg/m³ à 415 kg/m³.
- La réduction du rapport E/L a l'effet le plus important sur l'augmentation de la résistance en compression à tous les âges (de 1 jour à 1 an) et sur l'augmentation du coût unitaire du béton.
- L'augmentation du taux du remplacement du ciment par la poudre de verre a l'effet le plus significatif sur la réduction de la perméabilité aux ions chlores à 56, 91 et 180 jours.
- La réduction du rapport E/L et l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre montrent un effet quasi semblable sur la réduction de la perméabilité aux ions chlores à 28 jours et 1 an.
- Les bétons proportionnés avec de la poudre de verre montrent des gains de la résistance en compression importants entre 28 jours et 1 an.
- Une résistance en compression de 35 MPa à 28 jours peut être obtenue par des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de la poudre de verre. Elle peut être obtenue aussi par des bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,42 et incorporant 30% de la poudre de verre.
- Les bétons proportionnés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de la poudre de verre montrent une perméabilité aux ions chlores de 1500 Coulombs à 56 jours.
- Pour tous les rapports E/L étudiés, les bétons incorporant 30% de la poudre de verre affichent des valeurs de la perméabilité aux ions chlores inférieures à 1500 Coulombs à 56 jours.
- L'incorporation de 10% de la poudre de verre dans le béton cause une réduction significative de la perméabilité aux ions chlorures à 91, 180 jours et 1 an par rapport au béton témoin.

Phase 2

- Les bétons binaires incorporant 15%,20% et 25% de la poudre de verre montrent des gains importants de ses propriétés mécaniques entre 28 et 91 jours.
- Les bétons ternaires proportionnés avec (20%PV+5%FS) et le ciment ternaire (TerC³) ont une performance mécanique semblable à 56 et 91 jours.
- Les modèles de l'ACI donnent une bonne estimation de la résistance en traction et la résistance en flexion pour les bétons ternaires à 28 et 91 jours.
- Le modèle de l'ACI donne une excellente prédiction de la résistance en traction pour les bétons binaires incorporant de la poudre de verre à 91 jours.
- Le modèle Bael donne une bonne estimation du module d'élasticité pour les bétons binaires incorporant 20% et 25% de la poudre de verre à 28 et 91 jours. Pour les bétons ternaires, il donne une excellente prédiction du module d'élasticité à 28 et 91 jours.
- Pour les bétons incorporant des ajouts cimentaires, il est recommandé de mettre en question les modèles actuels utilisés pour la prédiction des propriétés mécaniques à partir de la résistance en compression à 28 jours. Ces modèles donnent une mauvaise estimation de la résistance en traction, la résistance en flexion et le module d'élasticité à 28 jours.
- Les bétons binaires incorporant de la poudre de verre développent des résistances en traction et des résistances en flexion supérieures à celle du béton témoin à 91 jours.
- Les bétons binaires et ternaires développent des modules d'élasticité supérieurs à ceux du béton témoin à 28 et 91 jours.
- Les bétons binaires et ternaires engendrent des valeurs de perméabilité aux ions chlorures inférieures à 1500 Coulombs à 56 jours.
- Les bétons binaires et ternaires incorporant de la poudre de verre montrent une réduction significative de la perméabilité aux ions chlorures entre 28 et 56 jours.
- Les bétons binaires et ternaires engendrent des pertes de masse supérieures à 500 gm/m² après être exposés à 56 cycles de gel-dégel.
- L'utilisation de la poudre de verre dans le béton représente une avenue intéressante pour produire des bétons à la fois durable et économique.

Liste de Références

- Aitcin, P-C (2000) GCI 710- Liant Hydrauliques. Notes de cours de l'université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Aitcin, P-C (2001) Bétons Haute performance. Éditions Eyrolles, Paris.683P.
- Aitcin, P-C (2003) The durability characteristics of high performance concrete: A review, Cement and concrete composites, v25, n4-5 SPEC, PP.409-420.
- Aladdine, F. (2009) Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 106 P.
- Aldea, C-M; Young, F; Wang, K; Shah, P.(2000) Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. Cement and Concrete Research, v 30, n 3, pp. 465-472.
- Armaghani, J.M; Romano, D.C et Larsen, T.J (1991) Strength and durability of concrete in Florida.Comptes rendus de second international conference on durability of concrete, supplementary papers, Montreal, pp. 723-748.
- ASTM C1202-97 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ions penetration.
- ASTM C143/C143M-03 Standard test method for slump of hydraulic cement concrete.
- ASTM C157/C157M-04 Standard test method for length change of hardened hydraulic cement, mortar and concrete.
- ASTM C231-04 Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method.
- ASTM C39/C39M-03 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- ASTM C457-98 Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete.
- ASTM C469-02 Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.
- ASTM C496/C496M-04 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
- ASTM C78-02 Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading).
- ASTM C666/C666M-03 Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing.

Bilodeau, A; Sivasundaram, V; Painter, K.E et Malhotra, V.M (1994) Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from different sources in the U.S. ACI materials journal, v 91,n 1, pp.3-12.

BNQ 2621-900-94 Détermination de la résistance à l'écaillage du béton soumis à des cycles de gel-dégel en contact avec des sels fondants.

Bouzoubaâ, N et Fournier, B (2003) Optimization of fly ash content in concrete Part I: Non-air-entrained concrete made without super plasticizer. Cement and Concrete Research, v 33, n 7, pp. 1029-1037.

Bouzoubaâ, N et Fournier, B (2005) Current situation with the production and use of supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete construction in Canada. Canadian Journal of Civil Engineering, v 32, n 1, pp. 129-43.

Bouzoubaâ, N; Bilodeau, A; Sivasundaram, V; Fournier, B et Golden, D, M (2004) Development of ternary blends for high-performance concrete. ACI materials journal, v 101, n 1, pp. 19-29.

Bouzoubaâ, N; Bilodeau, A; Fournier, B; Hooton, R.D; Gagné, R et John, M (2011) Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating fly ash and (or) silica fume: Laboratory and field side walk test data. Canadian journal of civil engineering, v 37, n 4, pp.373-382.

Bouzoubaâ, N; Bilodeau, A; Fournier, B; Hooton, R.D; Gagné, R et Jolin, M (2008) Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: Laboratory and field test data. Canadian journal of civil engineering, v 35, n 11, pp. 1261-1275.

Boyd, A.J et Hooton, D.R (2007) Long-term scaling performance of concretes containing supplementary cementing materials. Journal of materials in civil engineering, v 19, n 10, pp. 820-825.

Chanvillard, G; Jones, P.J et Aitcin, P-C (1993) Evaluation of the statistical significance of a regression and selection of the best regression using the coefficient of determination R^2 . Cement, concrete and aggregates, v15, n1, pp.31-38.

Chanvillard, G et Aitcin, P-C (1996) Pull-out behavior of corrugated steel fibers. Qualitative and statistical analysis. Advanced cement based materials, v 4, n 1, pp.28-41.

CSA standard A23.1 (2000) Method of test for concrete, Canadian Standard Association.

Fagerlund, G (1975) Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials, proceeding of the sixth international congress on the problems raised by frost action, Le Havre, France, Fondation Française d'études Nordiques, pp. 166-196.

Gagné, R (1992) La durabilité au gel des bétons à haute performance. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 433 P.

Gagné, R et Marchand, J (1993) La résistance à l'écaillage des bétons à haute performance : État de la question. Comptes rendus de l'atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, comité RILEM TC 117, Québec, Canada, p.23-47.

- Gagné, R (2000) GCI 714- Durabilité et réparation du béton. Notes de cours de l'université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Ganesan, K , Rajagopal, K. et Thangavel, K (2008) Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v 22, n 8, pp. 1675-1683.
- Golberg, M.A et Cho, H.A (2004) *Introduction to regression analysis*, WIT press, Southampton, Boston, 436 P.
- Güneyisi, E et Gesoglu, M (2008) A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v 41, n 3, pp. 479-493.
- Hadriche, M.S (1998) Modélisation de comportement du béton autoplaçant : Effet de la composition. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 244 P.
- Hossain, K.M.A et Lachemi, M (2007) Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete. *Cement and Concrete Research*, v 37, n 5, pp. 759-766.
- Jain, J.A et Neithalath, N (2010) Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes - Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites*, v 32, n 2, pp. 148-156.
- Keck, H.R (2001) *Improving Concrete Durability with Cementitious Materials*. *Concrete International* pp.47-51.
- Kessal, M ; Edwards-Lajnef, M; Tagnit-Hamou, A et Aitcin, P-C (1996) L'optimisation de la résistance à court terme des bétons fabriqués avec un ciment de type 20 M. *Canadian journal of civil engineering*, V.23, n 3; pp. 614-620.
- Kessal, M; Nkinamubanzi, P-C; Tagnit-Hamou, A et Aitcin, P-C (1996). Improving initial strength of concrete made with type 20 M cement. *Cement, Concrete and Aggregates*, V.18, n 1, pp. 49-54.
- Khatib, R (2009) Bétons autoplaçants à haute résistance , mûris à la vapeur, utilisés pour les éléments préfabriqués et précontraints. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 172 P.
- Khatri, R.P; Sirivivatnanon, V et Gross, W (1995) Effect of supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and concrete research*, v 25, n 1, pp.209-220.
- Khayat, K.H; Bickley, J.A et Hooton, R.D (1995) High-strength concrete properties derived from compressive strength values. *Cement, Concrete and aggregates*, v 17, n 2, pp. 126-133.
- Khayat, K.H; Yahia, A et Sonebi, M (1999) Applications of statistical models for proportioning underwater concrete. *ACI materials journal*, v 96, n 6, pp. 634-640.
- Khayat, K.H; Ghezal, A et Hadriche, M.S (2000) Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v 33, n 229, pp.338-344.

- Khayat, K.H (2001) GCI 711- Technologie avancée du béton. Notes des cours de l'université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Kumar, B; Tike, G.K et Nanda, P.K (2007) Evaluation of properties of high-volume-fly ash concrete for pavements. *Journal of materials in civil engineering*, v 19, n 10, pp. 906-911.
- Lachemi, M; Hossain, K.M.A; Lambros, V et Bouzoubâa, N (2003) Development of cost-effective self-consolidating concrete incorporating fly ash, slag cement, or viscosity-modifying admixtures. *ACI materials journal*, v 100, n 5, pp. 419-425.
- Laldji, S et Tagnit-Hamou, A (2006) Properties of ternary and quaternary concrete incorporating new alternative cementitious materials. *ACI materials journal*, v 103, n2, pp.83-89.
- Laldji, S et Tagnit-Hamou, A (2007) Glass frit for concrete structures: A new alternative cementitious material. *Canadian journal of Civil Engineering*, v 34, n 7, pp. 793-802.
- Laldji, S; Phithaksounthone, A et Tagnit-Hamou, A (2010) Synergistic effect between glass frit and blast furnace slag. *ACI materials journal*, v 107, n 1, pp.75-79.
- Louvet, F(1995) Cours de statistiques à l'usage des ingenieurs. Introduction aux plans d'expérience. École supérieure de l'énergie et des matériaux, Université d'Orléans, France. 70 p.
- Malhotra, V.M et Hemmings, R.T (1995) Blended cements in North America- a review. *Cement and concrete composites*, v 17, n 1, pp.23-35.
- Malhotra, V.M (2010) Global warming and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of Portland cement, *International journal of structural engineering*, v1, n2 ,pp.116-130.
- Marchand, J; Gagné, R; Pigeon, M; Jacobsen, S et Sellevold, E.J (1994) The frost durability of high-performance concrete, *CONSEC 95 Sapporo, Japan*, 16 P.
- Megat Johari, M.A; Brooks, J.J; Kabir, S et Rivard, P (2011) Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and building materials*, v 25, n 5, pp.2639-2648.
- Mehta, P.K (1998) Role of Pozzolan and Cementitious Materials in Sustainable Development of the Concrete Industry. *Proceedings, 6th CANMET/JCI International Conference*, 1, Bangkok, Thailand, pp. 1-20.
- Mehta, P.K et Monteiro, P.J-M (2006) *Concrete microstructure, properties and Materials*. Third Edition. McGraw-Hill, Newyork, USA.659 P.
- Montgomery, D.C (2009) *Design and analysis of experiments*, 7 th edition, Wiley, New York, 656 P.
- Muthukumar, M; Mohan, D et Rajendran, M (2003) Optimization of mix proportions of mineral aggregates using box bunken design of experiments. *Cement and Concrete Composites*, v 25, n 7, pp.751-758.

- Naik, T.R ; Singh, S.S. et Hossain, M.M (1995) Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash. *Construction and Building Materials*, v 9, n 4, pp. 195-204.
- Nazari, A et Riahi, S (2011) Splitting tensile strength of concrete using ground granulated blast furnace slag and SiO₂ nano particles as binder. *Energy and buildings*, v 43, n 4, pp.864-872.
- Neithalath, N (2011) An overview of the benefits of using glass powder as a partial cement replacement material in concretes. *Indian concrete journal*, v 85, n 2, pp.9-18.
- Nehdi, M; Mindess, S et Aitcin, P-C (1996) Optimisation of high strength limestone filler cement mortars. *Cement and concrete research*, v 26, n 6, pp.883-893.
- Neville, A.M (1995) *Properties of Concrete*. Fourth Edition. Longman House, Harlow, England.844 P.
- Nochaiya, T; Wongkeo, W et Chaipanich, A (2010) Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement- fly ash-silica fume concrete. *Fuel*, v 89, n 3, pp.768-774.
- Oluokun, F.A (1991) Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: Evaluation of existing relations for normal weight concrete. *ACI materials journal*, v 88, n 3, pp.302-309.
- Patagundi, B.R et Prakash, K.B (2008) Effect of chloride and sulphate attack on the properties of concrete containing waste glass powder as pozzolana. *Indian concrete journal*, v82, n12, pp.35-42.
- Patel, R; Hossain, K.M.A; Shehata, M; Bouzoubaâ, N et Lachemi, M (2004) Development of statistical models for mixture design of high-volume fly ash self-consolidating concrete. *ACI materials journal*, v 101, n 4, pp. 294-302.
- Perraton, D; Aitcin, P-C et Vézina, D (1988) Permeabilities of silica fume concretes. *ACI special publication SP-108*, Detroit, pp. 63-84.
- Pigeon, M; Gagné, R et Foy, C (1987) Critical air void spacing factor for low water-cement ratio concretes with and without condensed silica fume. *Cement and concrete research*, v 17, n 6, pp. 896-906.
- Pigeon, M; Talbot, C; Marchand, J et Hornain, H (1996) Surface microstructure and scaling resistance of concrete. *Cement and concrete research*, v 26, n 10, pp. 1555-1566.
- Plante, M ; Cameron, G et Tagnit-Hamou, A (2000) Influence of curing conditions on concrete specimens at construction site. *ACI materials journal*, v 97, n 2, pp.120-126.
- 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*, v 20, n 10, pp. 858-865.
- Ramezanianpour, A.A et Malhotra, V.M (1995) Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement and Concrete Composites*, v 17, n 2, pp.125-133.

- Rehan, R; Nehdi, M et Simonovic, S.P. (2005) Policy making for greening the concrete industry in Canada: A systems thinking approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v 32, n 1, pp. 99-113.
- Rougeron, P et Aitcin, P-C (1994) Optimization of the composition of a high-performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, v 16, n 2, pp. 115-124.
- Sado, G et Sado, M-C (1991) Les plans d'expérience de l'expérimentation à l'assurance qualité, 2 nd edition, Afnor, Paris, 265P.
- Saric-Coric, M (2001) Interactions superplastifiants- Laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 291 P.
- Saric-Coric, M et Aitcin, P-C (2003) High-performance concrete containing cement made from blast-furnace slag (Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v 30, n 2, pp. 414-428.
- Schwarz, N; Hieu, C et Neithalath, N (2008) Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and concrete composites*, v30, pp.486-496.
- Schwarz, N et Neithalath, N (2008) Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, v 38, n 4, p 429-436.
- Shao, Y; Lefort, T; Moras, S et Rodriguez, D (2000) Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and concrete research*, v30, n1, pp.91-100.
- Shayan, A et Xu, A (2004) Value-added utilization of waste glass in concrete., *Cement and concrete research*, v34, n1, 2004, pp.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*, v 36, n 3, pp. 457-468.
- Shi, C; Wu, Y; Riefler, C et Wang, H (2005) Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, v 35, n 5, pp. 987-993.
- Shi, C et Wu, Y (2005) Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. *ACI materials journal*, v 102, n 5, pp.355-363.
- Sonebi, M ; Tamimi, A.K et Bartos, P.J.M (2000) application of factorial models to predict the effect of anti-washout admixture, superplasticizer and cement on slump, flow time and wash out resistance of underwater concrete. *Materials and Structures /Matériaux et Constructions*, v 33, n 229, pp.317-323.
- Sonebi, M (2001) Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts. *Cement and concrete research*, v 31, n 11, pp. 1553-1560.
- Sonebi, M (2002) Experimental design to optimize high-volume of fly ash grout in the presence of welangum and superplasticizer. *Materials and structures/Matériaux et constructions*, v 35, n 250, pp.373-380.

- Sonebi, M (2004) Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and concrete research*, v 34, n 7, pp. 1199-1208.
- Sonebi, M (2004) Applications of statistical models in proportioning medium-strength self – consolidating concrete. *ACI materials journal*, v 101, n 5, pp. 339-346.
- Sonebi, M; Svermova, L et Bartos, P.J.M (2005) Statistical modelling of cement slurries for self – compacting SIFCON containing silica fume. *Materials and structures/Matériaux et constructions*, v 38, n 275, pp.79-86.
- Sonebi, M (2010) Optimisation of cement grouts containing silica fume and viscosity modifying admixtures. *Journal of materials in civil engineering*, v 22, n 4, pp. 332-342.
- Svermova, L; Sonebi, M et Bartos, P.J.M (2003) Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder. *Cement and concrete composites*, v 25, n 7, pp.737-749.
- Tagnit-Hamou, A. (2005) GCI 712 : Microstructure et Physico-chimie des ciments et des bétons. Notes de cours de l'université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec.
- Tagnit-Hamou, A et Bengougam, A (2012) The use of glass powder as supplementary cementitious material. Field trials in slab, wall, and side walk concrete mixtures. *Concrete international*, pp. 2-7.
- Taha, B et Nounou, G (2008) Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors *Cement and Concrete Composites*, v 30, n 6, pp. 497-505.
- Taha, B et Nounou, G (2008) Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, v 22, n 5, pp. 713-720.
- Thomas, M.D.A ; Shehata, M.H.; Shashiprakash, S.G.; Hopkins, D.S. et Cail, K (1999) Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, v 29, n 8, pp., 1207-1214.
- Toutanji, H ; Delatte, N.; Aggoun, S.; Duval, R. et Danson, A (2004) Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and Concrete Research*, v 34, n 2, pp 311-319.
- Uzal, B; Turanli, L et Mehta, P.K (2007) High-Volume natural pozzolan concrete for structural applications. *ACI materials journal*, v 104, n 5, pp. 535-538.
- Whiting, D (1988) Permeability of selected concretes. *Permeability of concrete*, ACI SP-108, Detroit, pp. 195-224.
- Yahia, A (1997) Rhéologie et performance des coulis du ciment destinés à la consolidation structurale d'ouvrages submergées. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 213 P.
- Yahia, A et Khayat, K.H (2001) Experimental design to evaluate interaction of high-rang-water-reducer and anti wash out admixture in high-performance cement grout. *Cement and concrete research*, v 31, n 5, pp. 749-757.

Zhang, M-H et Malhotra, V.M (1996) High-Performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. ACI materials journal, v 93,n 6, pp.629-636.

Zidol, A. (2009) Optimisation de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 156 P.

Zidol, A (2010) Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre. Définition de projet de recherche au doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 70 P.

Annexe 1

Phase 1

Effet des différents paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton incorporant de la poudre de verre

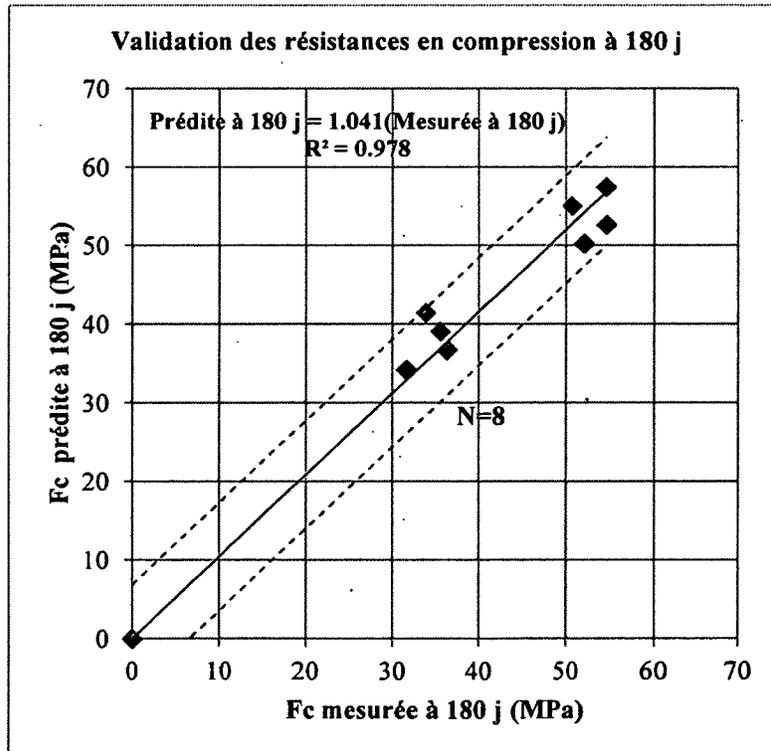
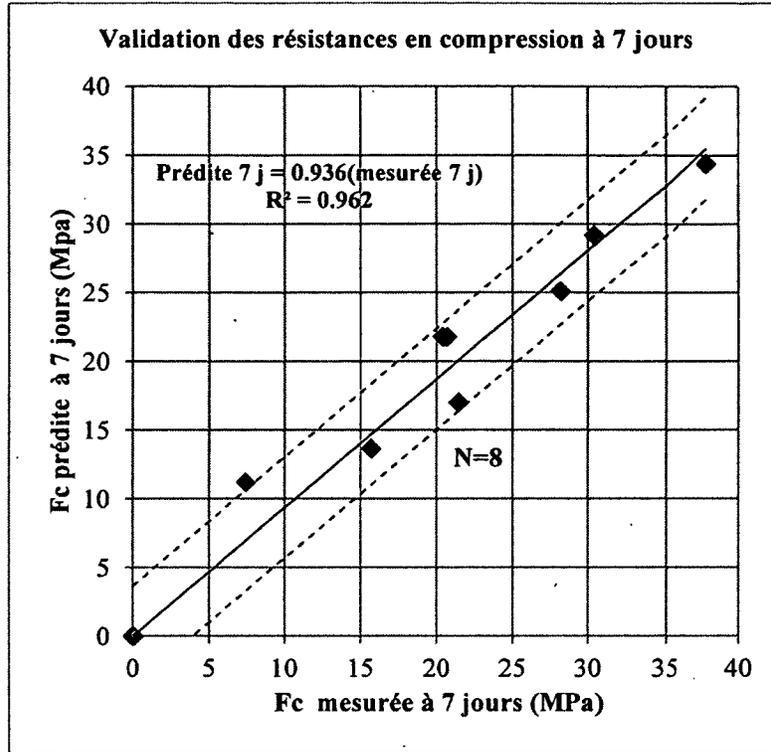


Figure : Validation des modèles statistiques

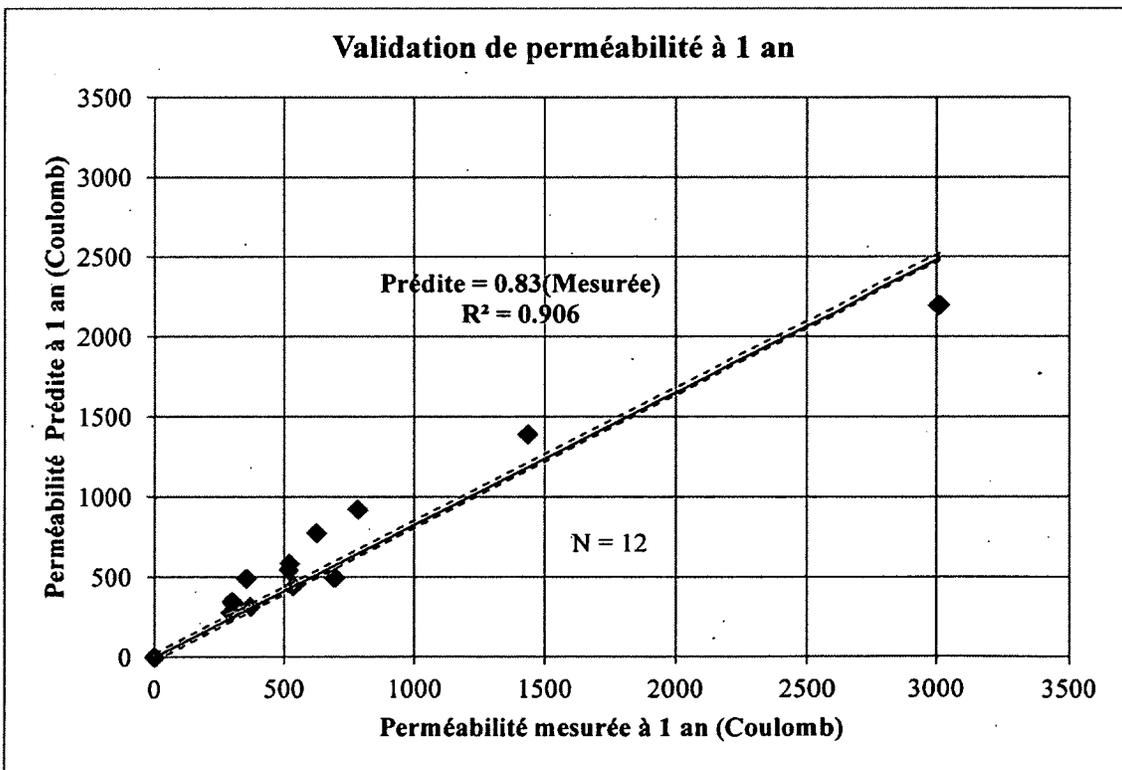
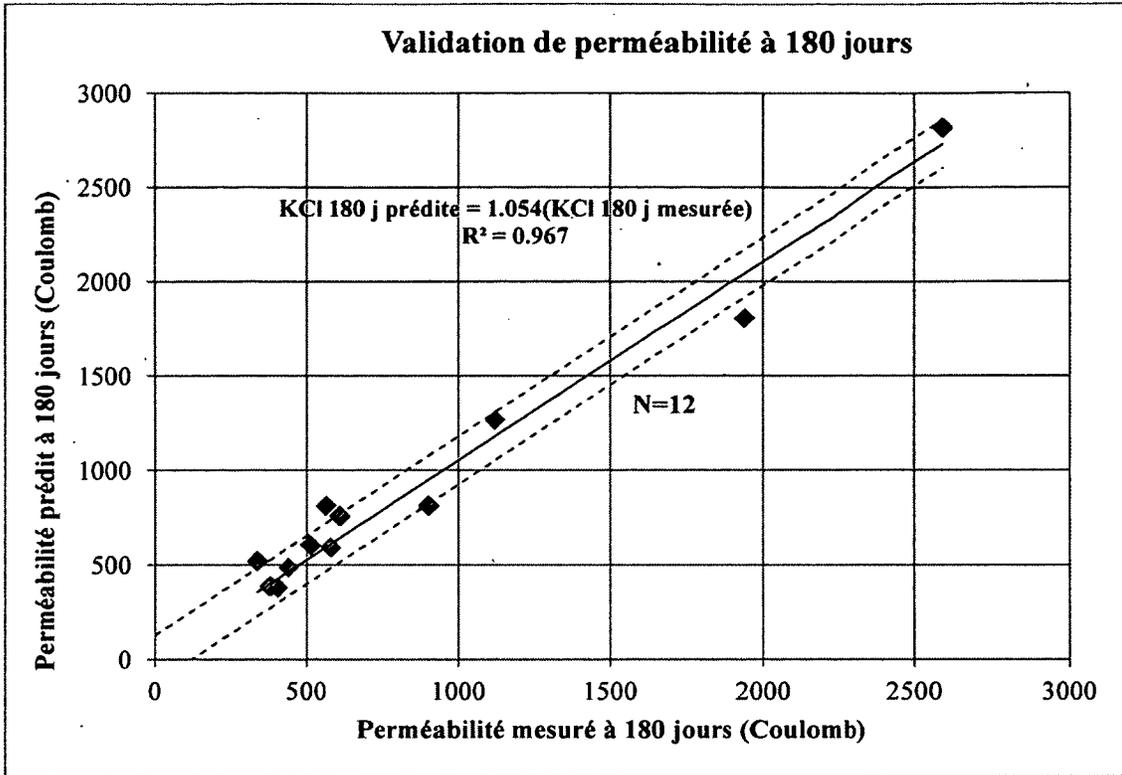


Figure : Validation des modèles statistiques

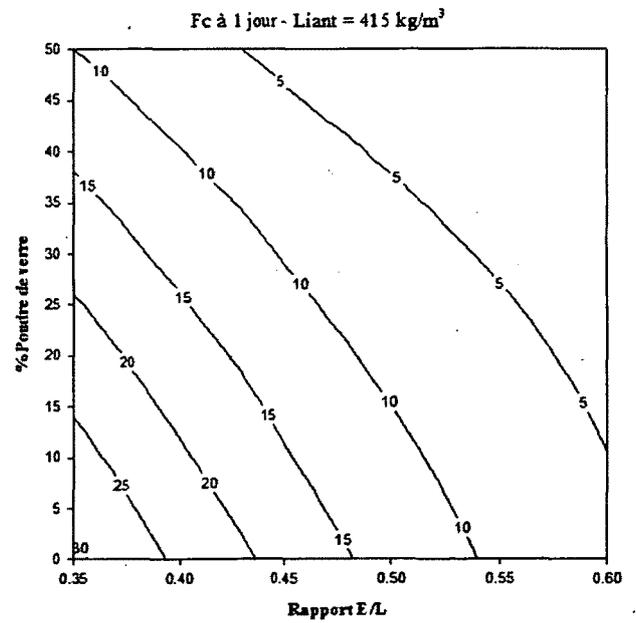
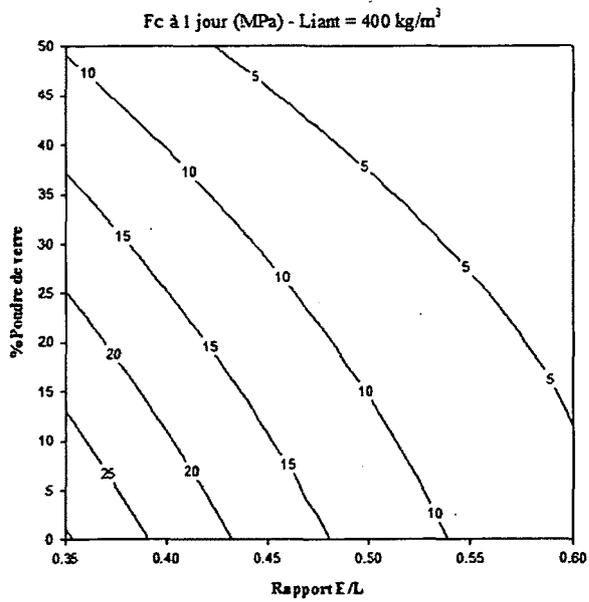
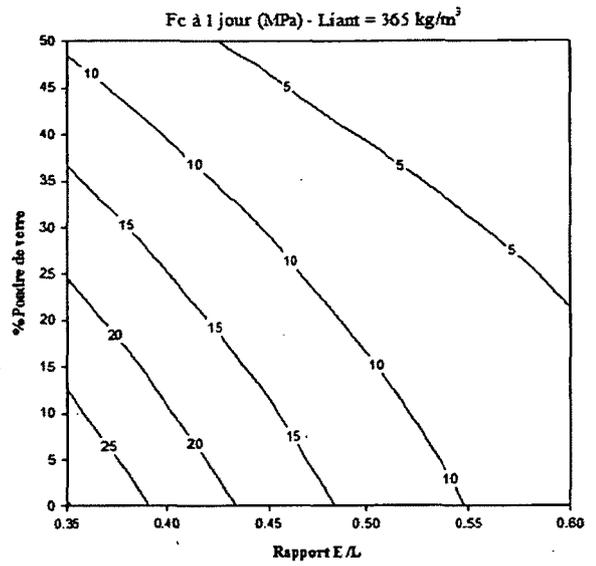
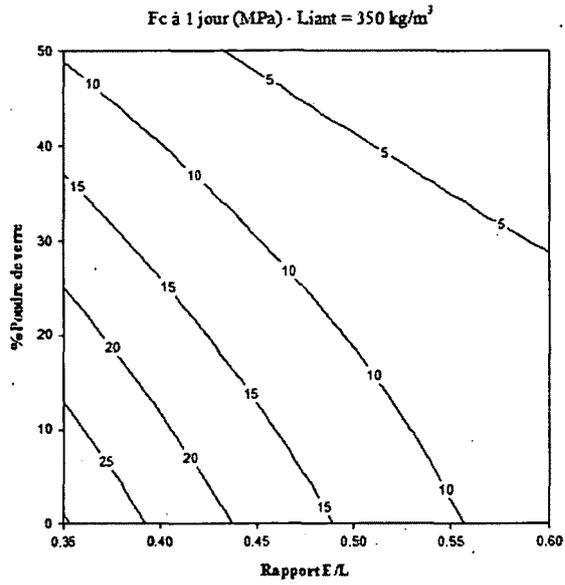


Figure: Courbes Iso-réponse pour la résistance en compression à 1 jour

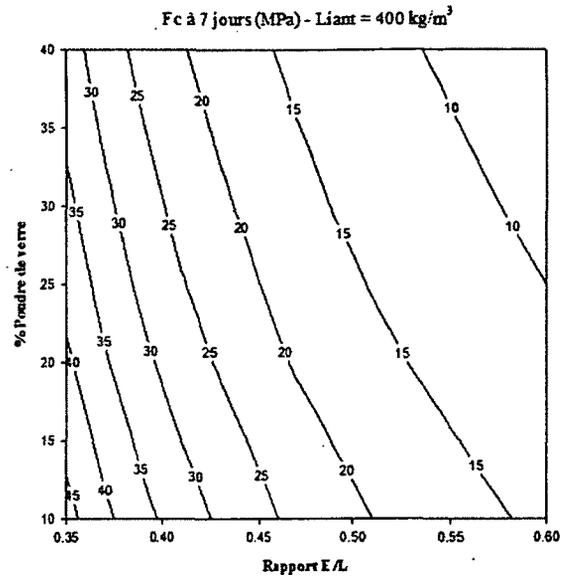
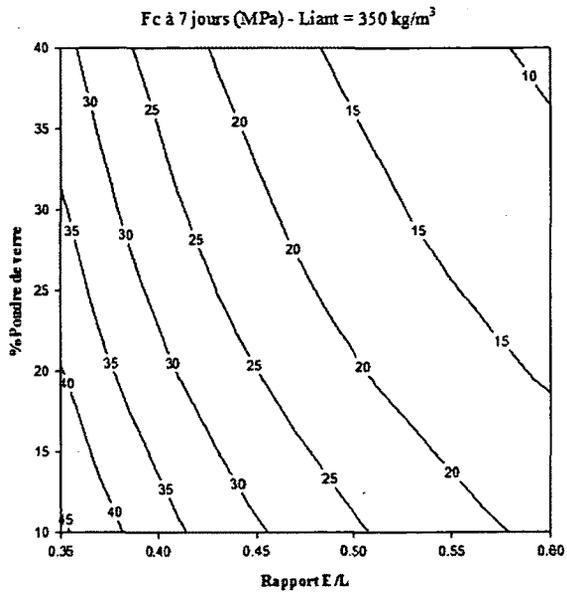


Figure : Courbes iso-réponse de la résistance en compression à 7 jours

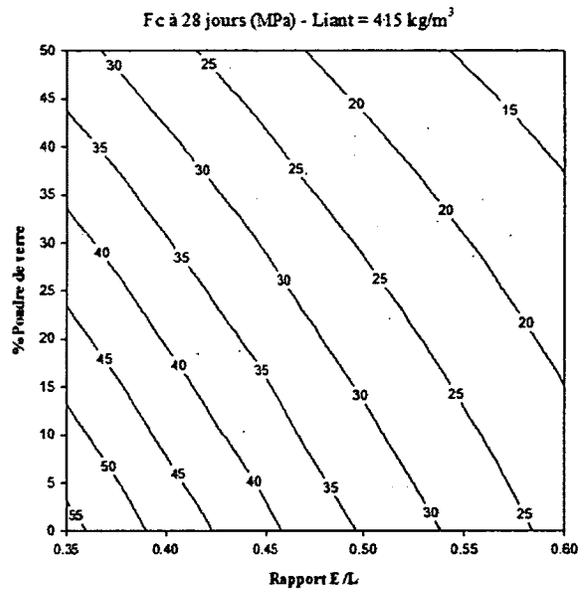
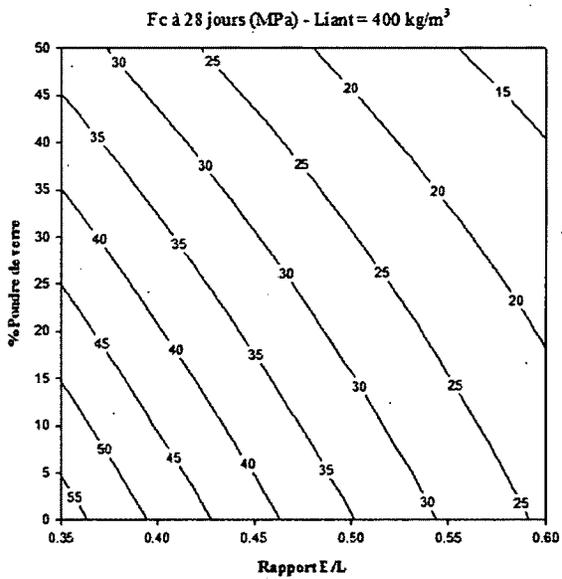
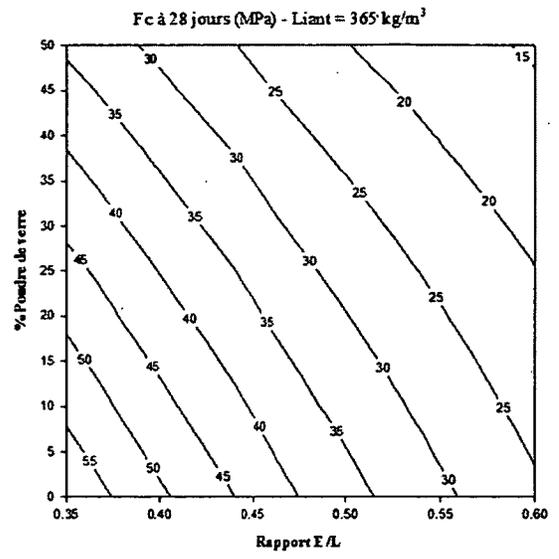
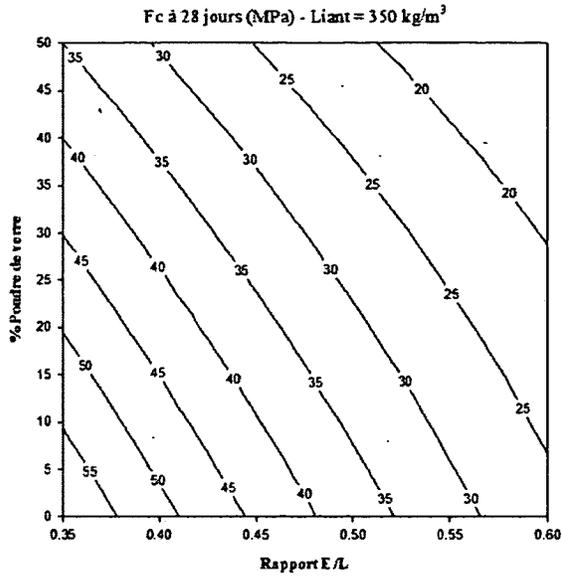


Figure : Courbes iso-réponse de la résistance en compression à 28 jours

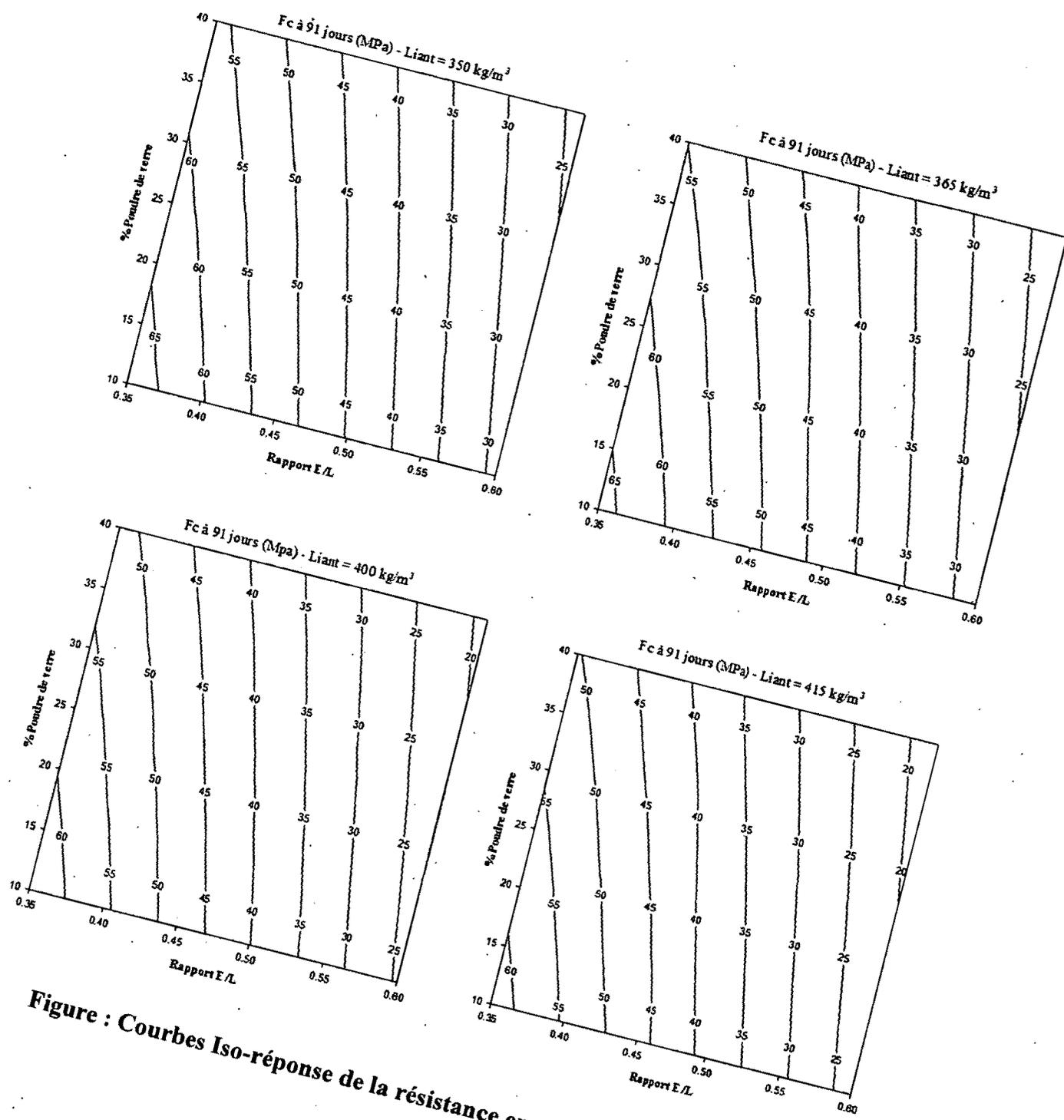


Figure : Courbes Iso-réponse de la résistance en compression à 91 jours

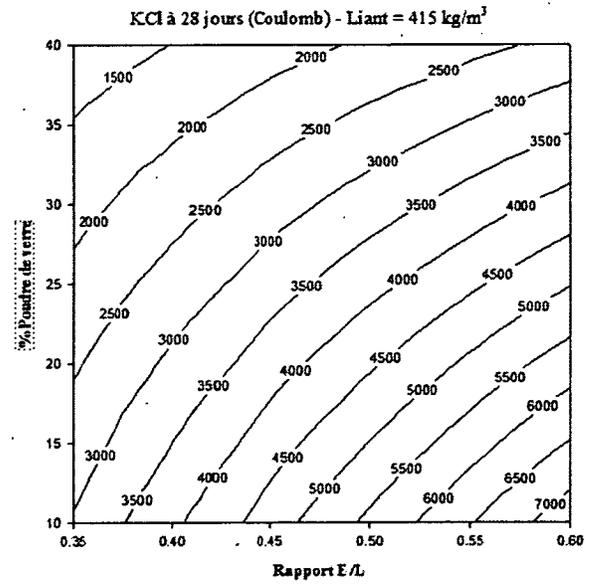
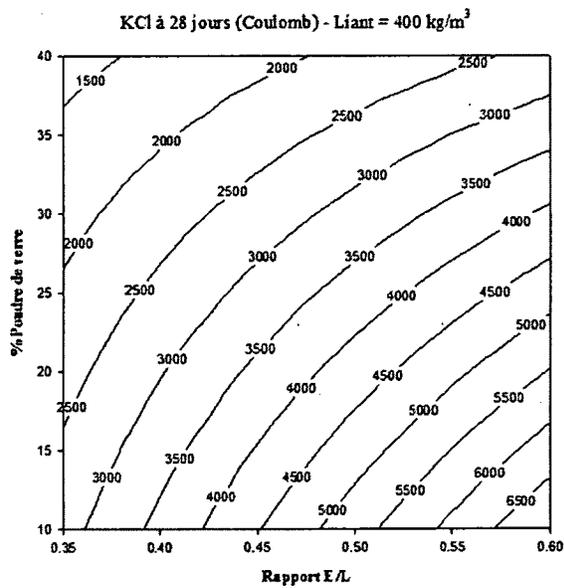
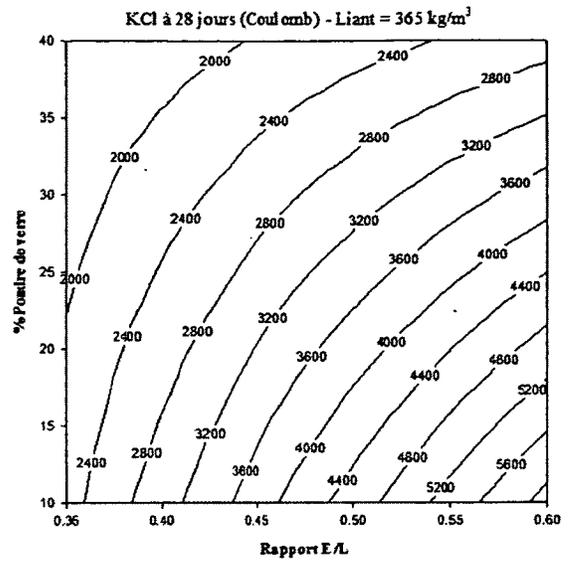
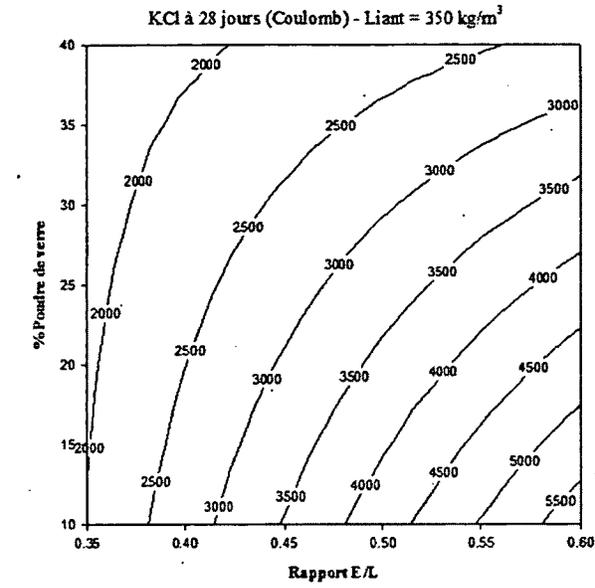


Figure : Courbes iso-réponse pour la perméabilité à 28 jours

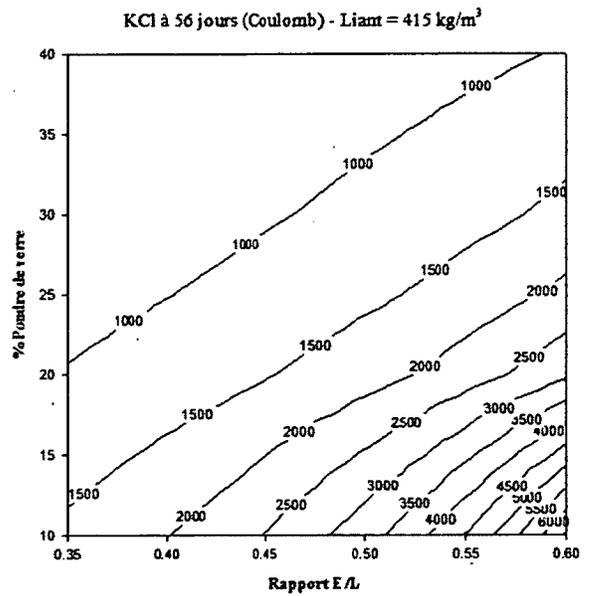
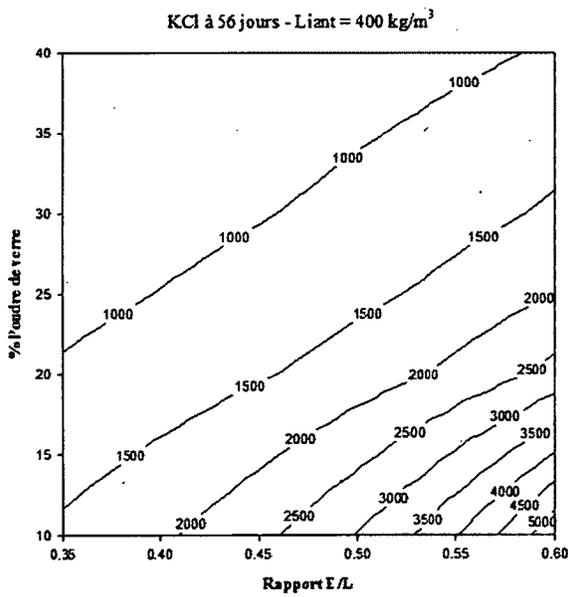
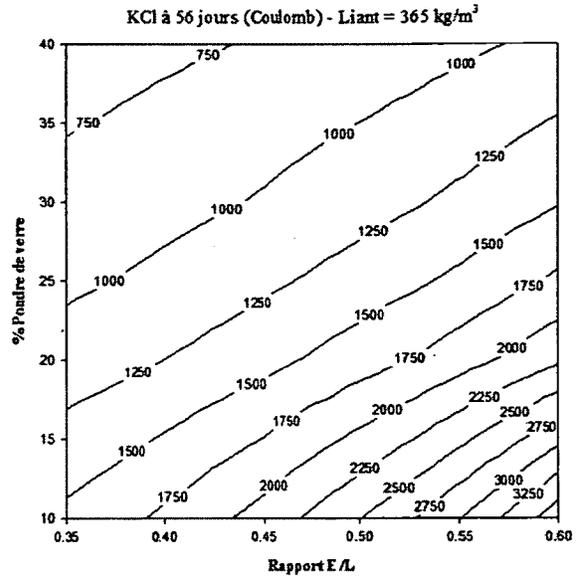
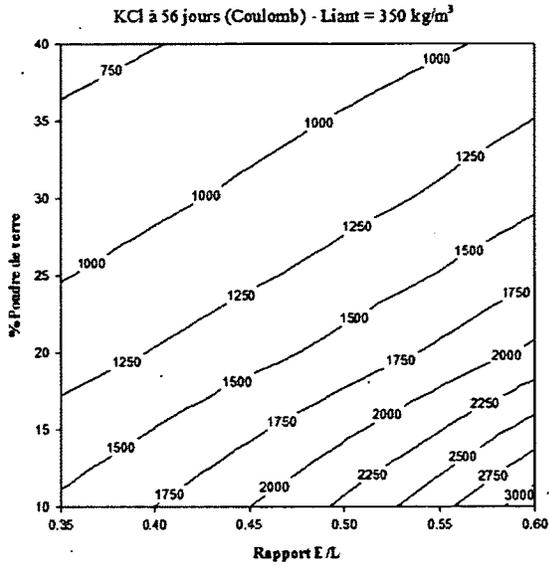


Figure : Courbes iso-réponse pour la perméabilité à 56 jours

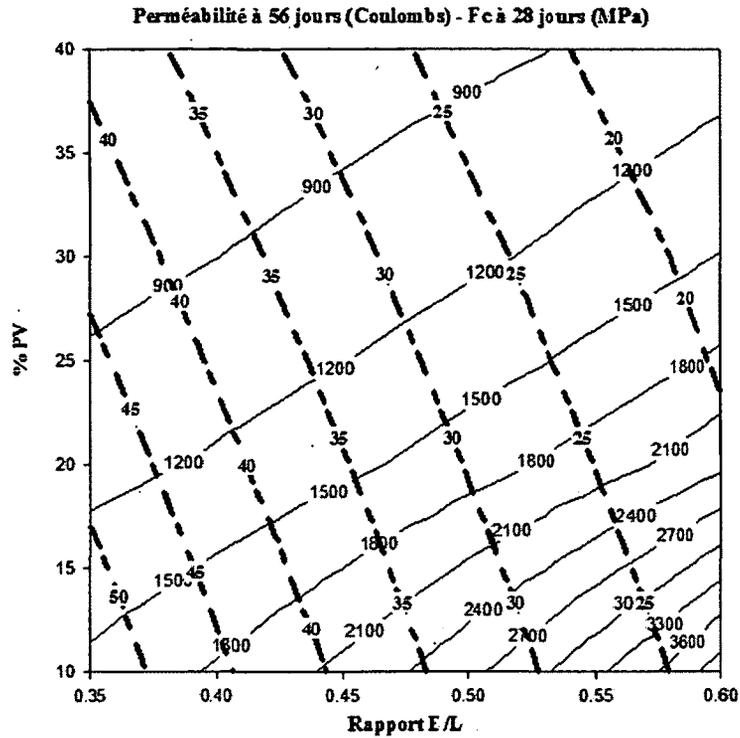


Figure : Relation entre la résistance en compression à 28 jours et la perméabilité à 56 jours

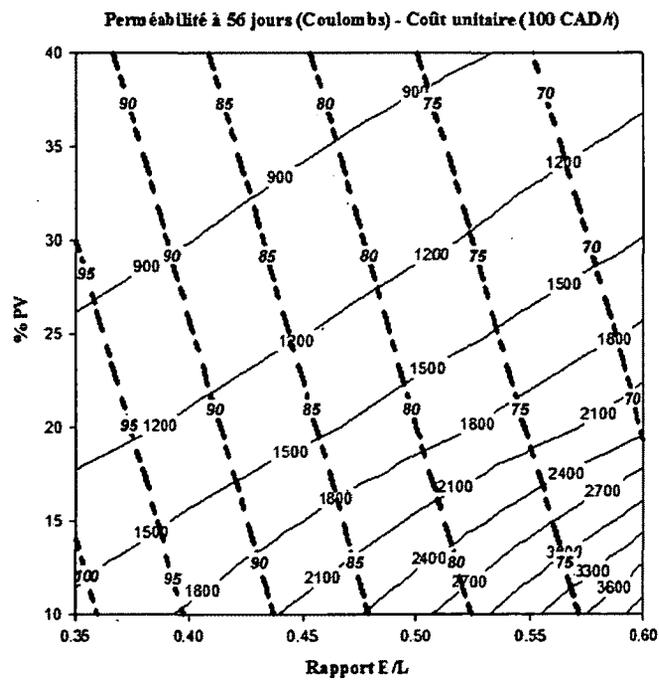


Figure : Relation entre la perméabilité à 56 jours et le coût unitaire (100 CAD/t)

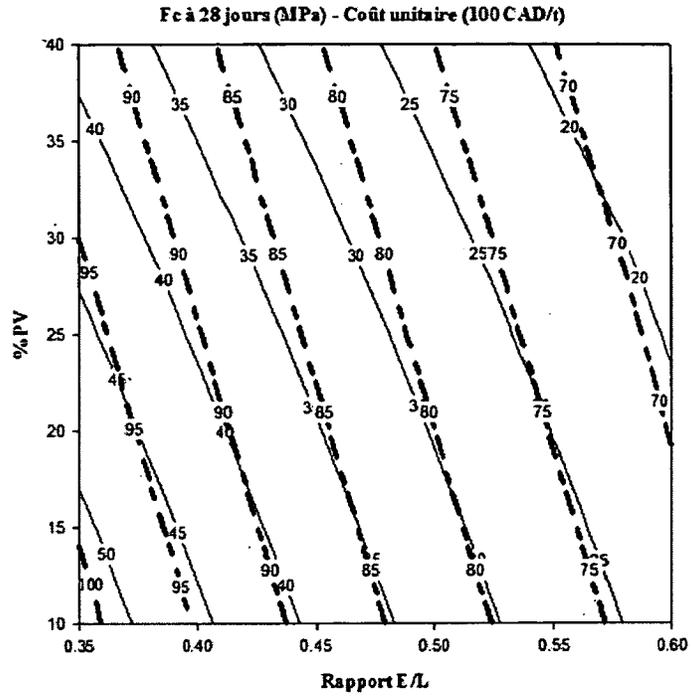


Figure : Relation entre la résistance à 28 jours et le coût unitaire (100 CAD/t)

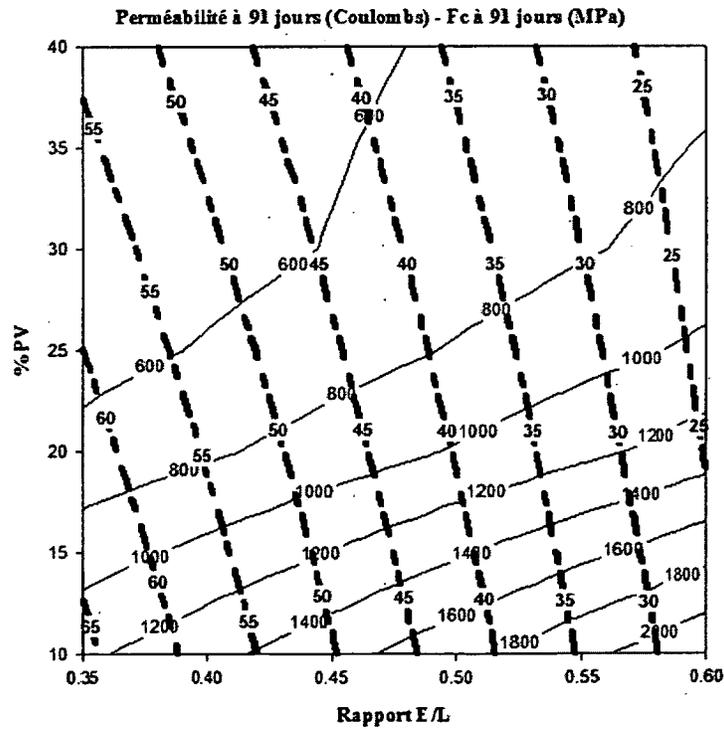


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 91 jours

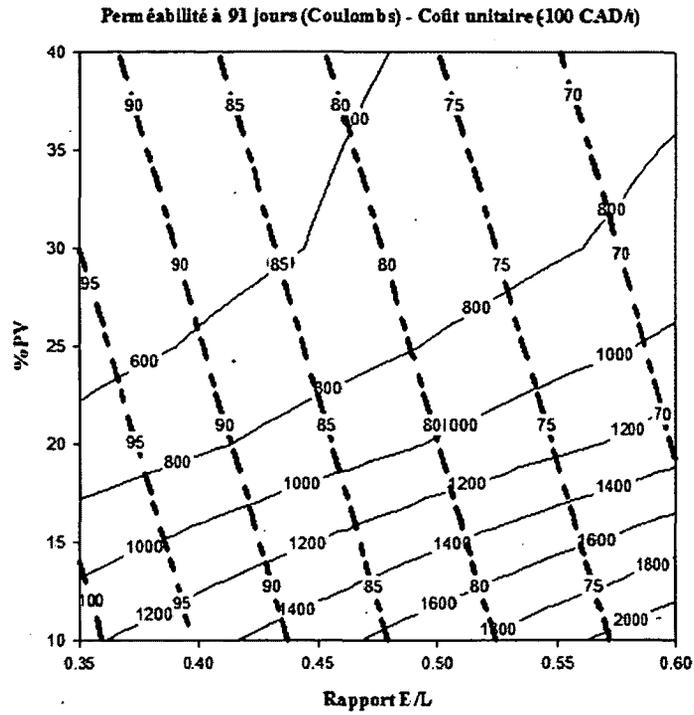


Figure : Relation entre la perméabilité à 91 jours et le coût unitaire (100 CAD/t)

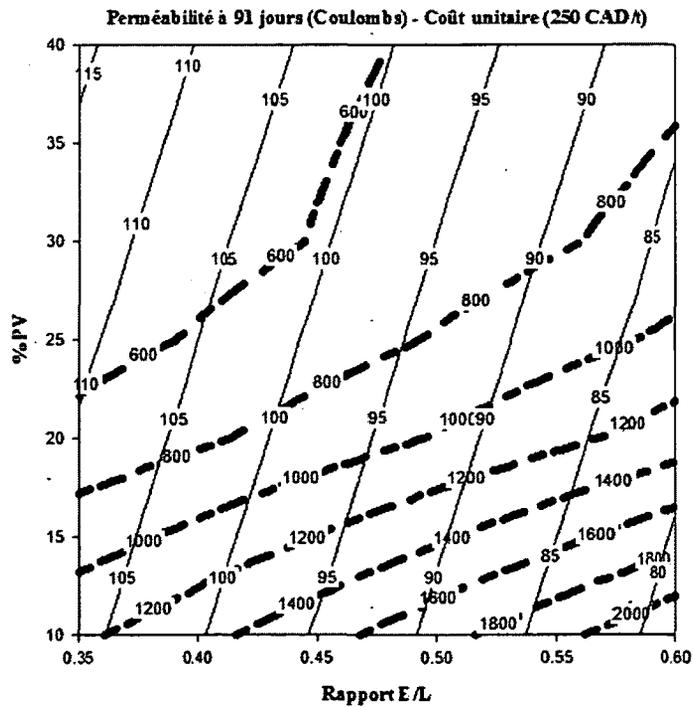


Figure : Relation entre la perméabilité à 91 jours et le coût unitaire (250 CAD/t)

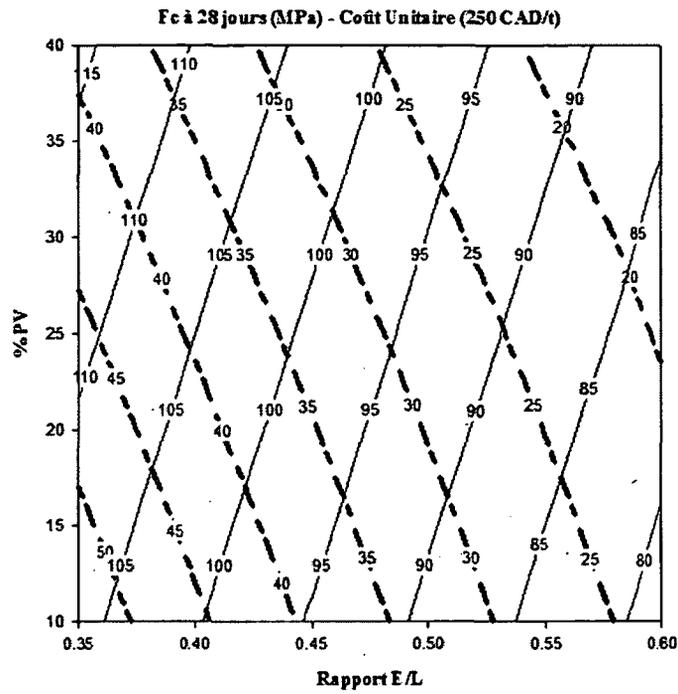


Figure : Relation entre la résistance en compression à 28 jours et le coût unitaire (250 CAD/t)

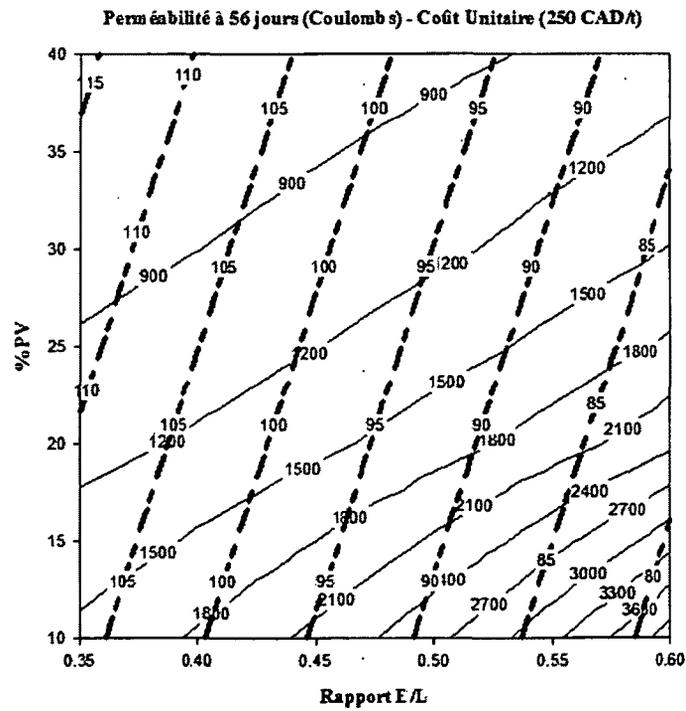


Figure : Relation entre la perméabilité à 56 jours et le coût unitaire (250 CAD/t)

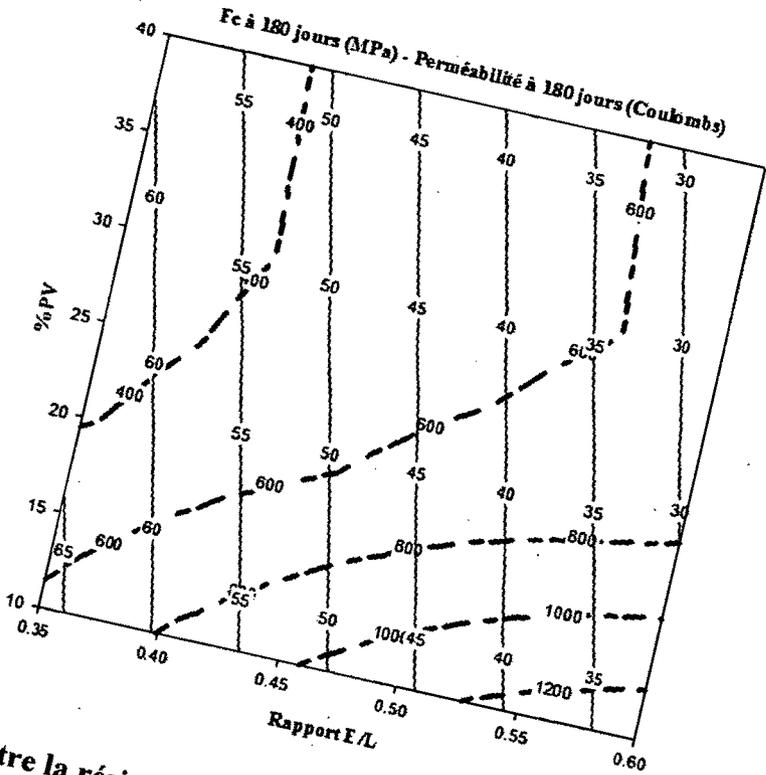


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 180 jours

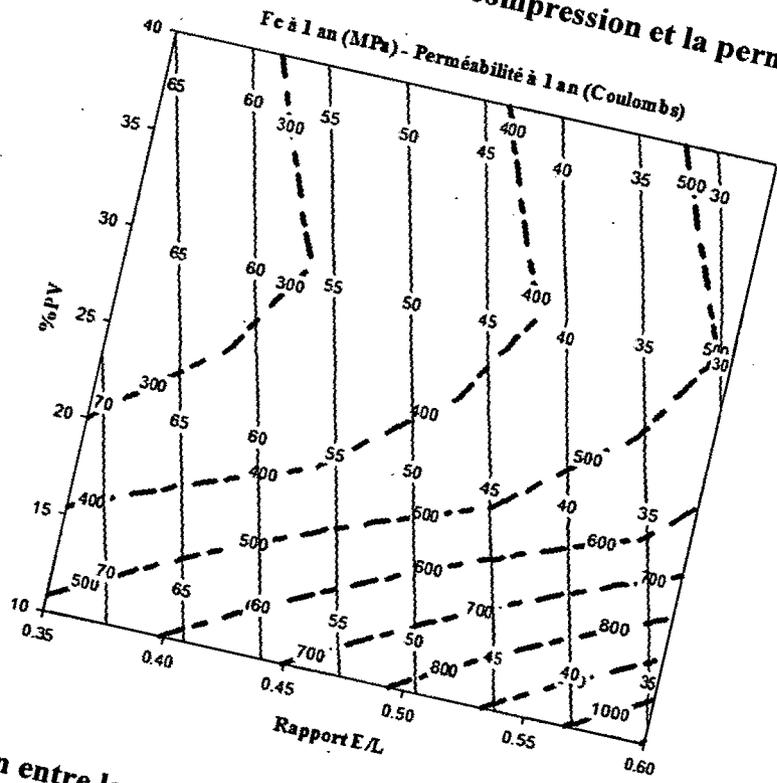


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 1 an

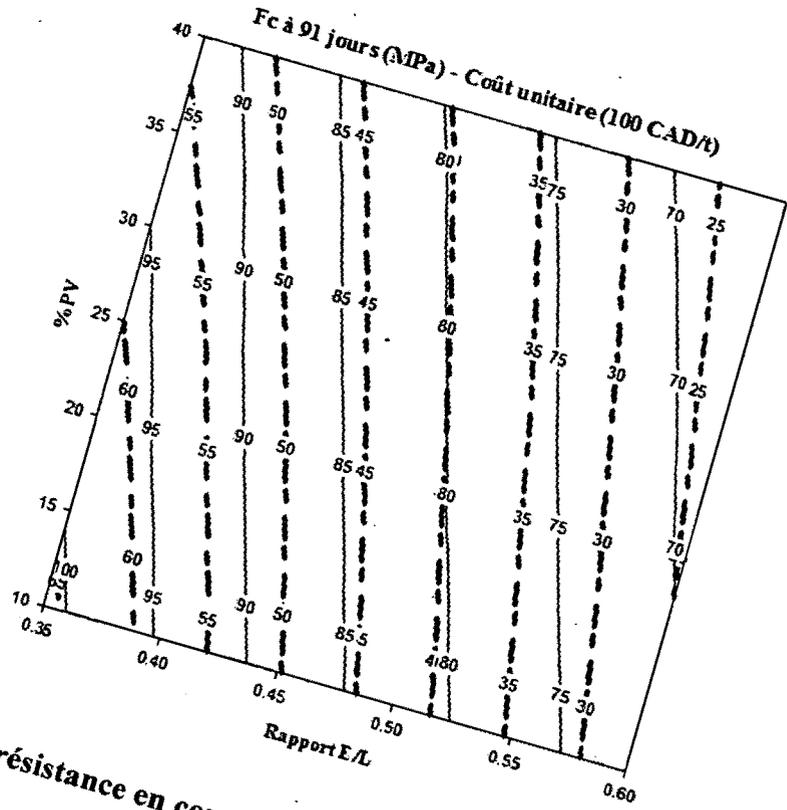


Figure : Relation entre la résistance en compression à 91 jours et le coût unitaire (100 CAD/t)

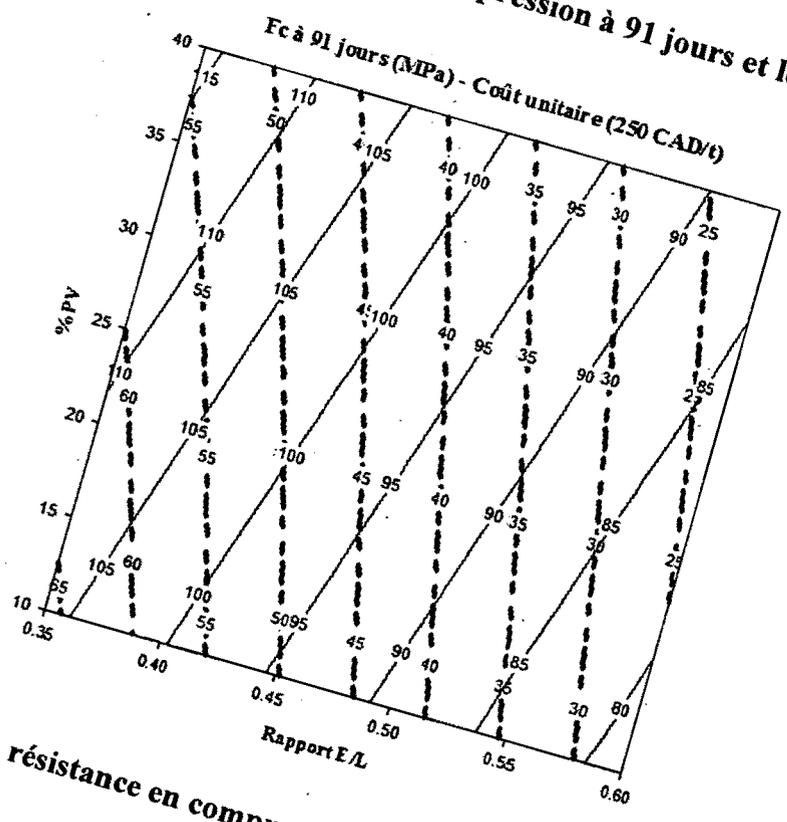


Figure : Relation entre la résistance en compression à 91 jours et le coût unitaire (250 CAD/t)

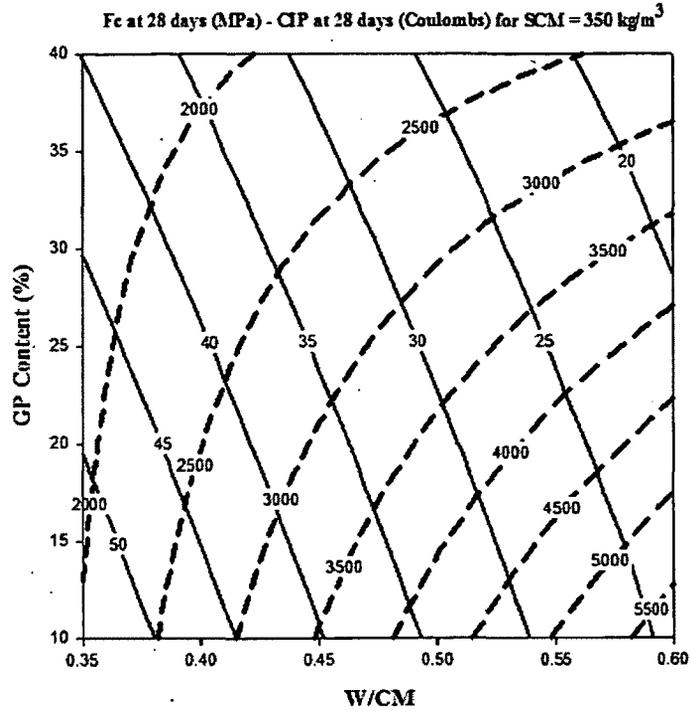


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 28 jours pour liant = 350 kg/m³

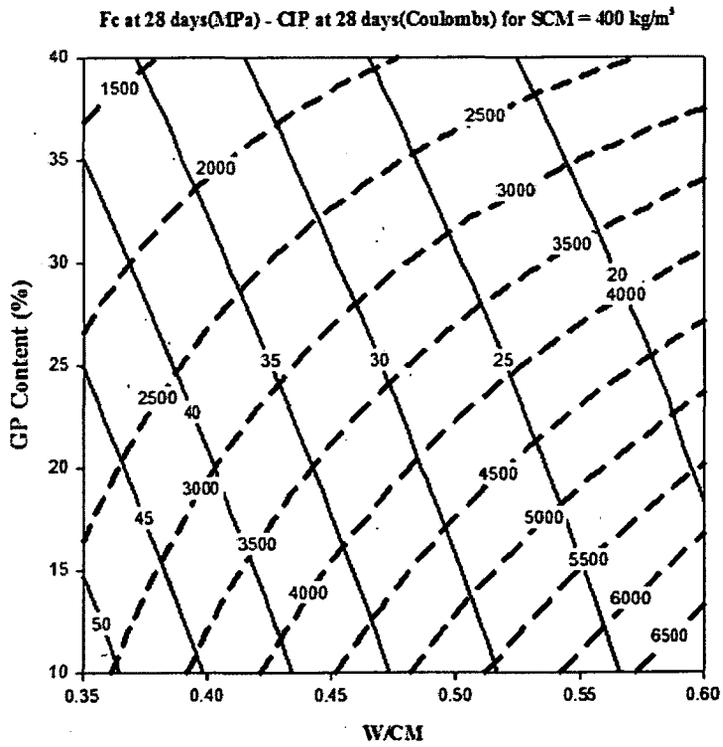


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 28 jours pour liant = 400 kg/m³

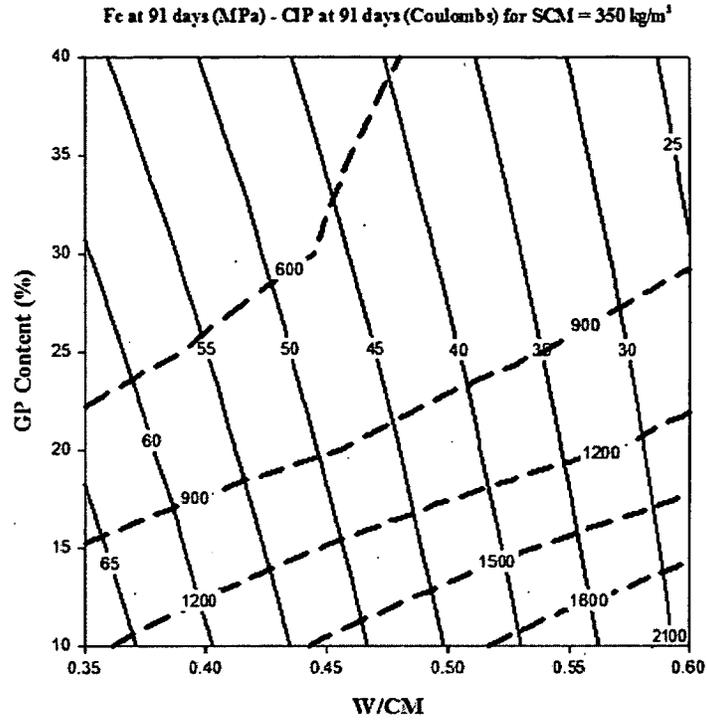


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 91 jours pour liant = 350 kg/m³

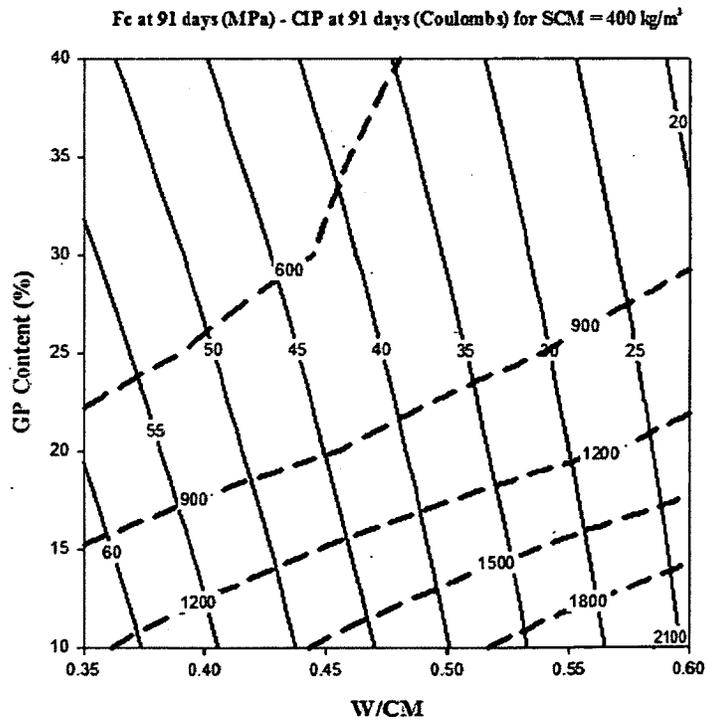


Figure : Relation entre la résistance en compression et la perméabilité à 91 jours pour liant = 400 kg/m³

Annexe 2

Phase 2

La caractérisation complète et la durabilité des mélanges optimisés

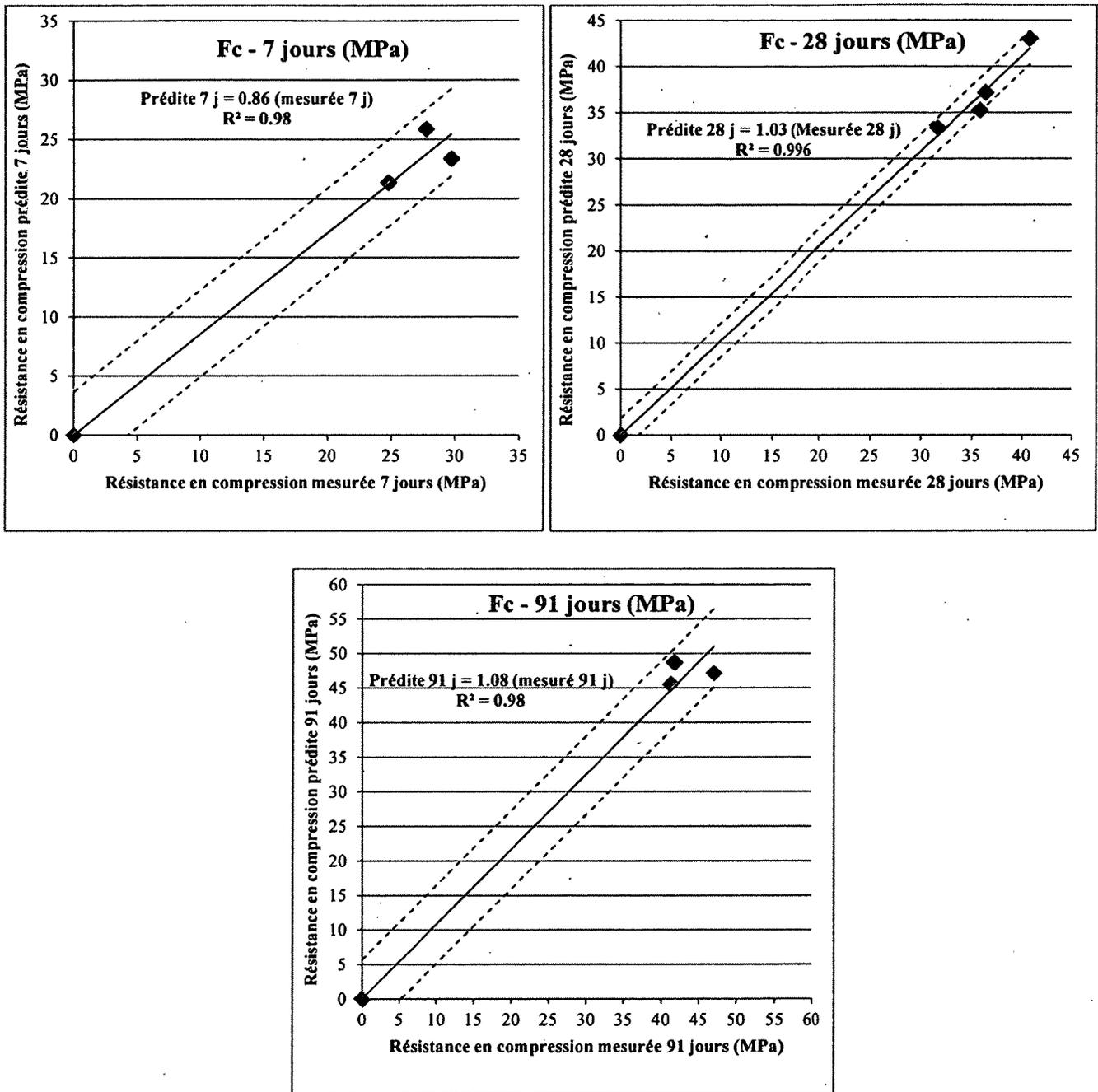


Figure : Validation des valeurs de la résistance en compression des mélanges de phase 2 avec les modèles proposés

Tableau : Les valeurs théoriques de la résistance en traction

Mélange	$F_t = 0,6 * \lambda * \sqrt{F_c}$ (CSA)		$F_t = 0,59 * F_c^{0,55}$ (ACI)		$F_t = 0,273 * F_c^{3/2}$ (Euro)	
	28 jours	91 jours	28 jours	91 jours	28 jours	91 jours
Tém.0,45	3,83	4,06	4,54	4,83	3,23	3,49
0,45-15PV	3,62	3,87	4,26	4,59	2,99	3,28
0,45-20PV	3,59	4,11	4,22	4,90	2,97	3,55
0,45-25PV	3,38	3,85	3,94	4,56	2,73	3,25
20PV+5FS	3,99	4,30	4,75	5,15	3,42	3,77
Tercem3000	3,87	4,05	4,59	4,82	3,28	3,48
TerC3	3,96	4,44	4,71	5,33	3,39	3,94

Tableau : Les valeurs théoriques de la résistance en traction

Mélange	$F_t = 0,54 \sqrt{F_c}$ (Carrasquillo et al.)		$F_t = 0,462 F_c^{0,55}$ (Ahmad et Shah)	
	28 jours	91 jours	28 jours	91 jours
Tém.0,45	3,45	3,65	3,55	3,78
0,45-15PV	3,26	3,49	3,34	3,60
0,45-20PV	3,23	3,70	3,31	3,84
0,45-25PV	3,04	3,47	3,09	3,57
20 PV+5 FS	3,60	3,87	3,72	4,03
Tercem3000	3,48	3,64	3,59	3,77
TerC3	3,57	4,00	3,69	4,18

Tableau : Rapport entre les résistances en traction mesurées et prédites (ACI)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 91 j
Tém.0.45	4,39	4,54	0,97	4,60	4,83	0,95
0,45-15PV	2,97	4,26	0,70	4,81	4,59	1,05
0,45-20PV	3,37	4,22	0,80	4,83	4,90	0,99
0,45-25PV	3,32	3,94	0,84	4,72	4,56	1,03
20 PV+5 FS	3,97	4,75	0,83	5,04	5,15	0,98
Tercem3000	4,92	4,59	1,07	4,97	4,82	1,03
TerC3	5,02	4,71	1,06	5,24	5,33	0,98

Tableau : Rapport entre les résistances en traction mesurées et prédites (CSA)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 91 j
Tém.0,45	4,39	3,83	1,15	4,60	4,06	1,13
0,45-15PV	2,97	3,99	0,74	4,81	3,87	1,24
0,45-20PV	3,37	3,87	0,87	4,83	4,11	1,18
0,45-25PV	3,32	3,96	0,84	4,72	3,85	1,22
20 PV+5 FS	3,97	3,99	0,99	5,04	4,30	1,17
Tercem3000	4,92	3,87	1,27	4,97	4,05	1,23
TerC3	5,02	3,96	1,27	5,24	4,44	1,18

Tableau : Rapport entre les résistances en traction mesurées et prédites (Euro)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 91 j
Tém.0,45	4,39	3,23	1,36	4,60	3,49	1,32
0,45-15PV	2,97	2,99	0,99	4,81	3,28	1,47
0,45-20PV	3,37	2,97	1,14	4,83	3,55	1,36
0,45-25PV	3,32	2,73	1,21	4,72	3,25	1,45
20 PV+5 FS	3,97	3,42	1,16	5,04	3,77	1,34
Tercem3000	4,92	3,28	1,50	4,97	3,48	1,43
TerC3	5,02	3,39	1,48	5,24	3,94	1,33

Tableau : Rapport entre les résistances en traction mesurées et prédites (Carrasquillo et al.)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 91 j
Tém.0,45	4,39	3,45	1,27	4,60	3,65	1,26
0,45-15PV	2,97	3,26	0,91	4,81	3,49	1,38
0,45-20PV	3,37	3,23	1,04	4,83	3,70	1,31
0,45-25PV	3,32	3,04	1,09	4,72	3,47	1,36
20 PV+5 FS	3,97	3,60	1,10	5,04	3,87	1,30
Tercem3000	4,92	3,48	1,41	4,97	3,64	1,37
TerC3	5,02	3,57	1,40	5,24	4,00	1,31

Tableau : Rapport entre les résistances en traction mesurées et prédites (Ahmad et Shah)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesuré/Prédit) 91 j
Tém.0,45	4,39	3,55	1,24	4,60	3,78	1,22
0,45-15PV	2,97	3,34	0,89	4,81	3,60	1,34
0,45-20PV	3,37	3,31	1,02	4,83	3,84	1,26
0,45-25PV	3,32	3,09	1,07	4,72	3,57	1,32
20 PV+5 FS	3,97	3,72	1,07	5,04	4,03	1,25
Tercem3000	4,92	3,59	1,37	4,97	3,77	1,32
TerC3	5,02	3,69	1,36	5,24	4,18	1,25

Tableau : Rapport entre les résistances en flexion mesurées et prédites (ACI)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 91 j
Tém.0,45	5,03	6,00	0,84	5,07	6,36	0,80
0,45-15PV	5,64	5,67	1,00	8,01	6,07	1,32
0,45-20PV	5,14	5,62	0,91	6,80	6,44	1,06
0,45-25PV	4,45	5,29	0,84	7,03	6,03	1,17
20 PV+5 FS	6,52	6,26	1,04	6,90	6,73	1,02
Tercem3000	6,68	6,07	1,10	6,71	6,34	1,06
TerC3	6,65	6,21	1,07	7,01	6,96	1,01

Tableau : Rapport entre les résistances en flexion mesurées et prédites (Burg et Ost)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesuré/Prédit) 91 j
Tém.0,45	5,03	6,58	0,76	5,07	6,97	0,73
0,45-15PV	5,64	6,21	0,91	8,01	6,65	1,20
0,45-20PV	5,14	6,17	0,83	6,80	7,06	0,96
0,45-25PV	4,45	5,80	0,77	7,03	6,61	1,06
20 PV+5 FS	6,52	6,86	0,95	6,90	7,38	0,93
Tercem3000	6,68	6,65	1,00	6,71	6,95	0,97
TerC3	6,65	6,81	0,98	7,01	7,62	0,92

Tableau : Rapport entre les résistances en flexion mesurées et prédites (Khayat et al.)

	Mesurée 28 j (MPa)	Prédite 28 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 28 j	Mesurée 91 j (MPa)	Prédite 91 j (MPa)	(Mesurée/Prédite) 91 j
Tém.0,45	5,03	4,76	1,06	5,07	5,26	0,96
0,45-15PV	5,64	4,31	1,31	8,01	4,85	1,65
0,45-20PV	5,14	4,25	1,21	6,80	5,39	1,26
0,45-25PV	4,45	3,81	1,17	7,03	4,80	1,46
20 PV+5 FS	6,52	5,13	1,27	6,90	5,82	1,18
Tercem3000	6,68	4,85	1,38	6,71	5,24	1,28
TerC3	6,65	5,06	1,31	7,01	6,15	1,14

Tableau : Les valeurs théoriques de module d'élasticité

Mélange	$E_c = 5 \cdot \sqrt{f_c}$ (CAN A23.3-M84)		$E_c = 9 \cdot f_c^{1/3}$ (Euro)		$E_c = 11 \cdot f_c^{1/3}$ (Bael)	
	28 jours	91 jours	28 jours	91 jours	28 jours	91 jours
Tém.0,45	31,93	33,83	30,97	32,19	37,87	39,34
0,45-15PV	30,10	32,29	29,82	31,21	36,45	38,15
0,45-20PV	29,94	34,28	29,67	32,48	36,27	39,70
0,45-25PV	28,15	32,10	28,48	31,08	34,80	38,00
20 PV+5 FS	33,33	35,83	31,87	33,45	38,96	40,88
Tercem3000	32,27	33,73	31,19	32,13	38,13	39,27
TerC3	33,05	37,01	31,70	34,18	38,74	41,78

Tableau : Rapport entre les valeurs mesurées et prédites de module d'élasticité (Bael)

	Mesuré 28 j (GPa)	Prédit 28 j (GPa)	(Mesuré/Prédit) 28 j	Mesuré 91 j (GPa)	Prédit 91 j (GPa)	(Mesuré/Prédit) 91 j
Tém.0,45	34,41	37,87	0,91	36,08	39,34	0,92
0,45-15PV	40,50	36,45	1,11	43,10	38,15	1,13
0,45-20PV	37,40	36,27	1,03	41,80	39,70	1,05
0,45-25PV	34,97	34,80	1,00	38,92	38,00	1,02
20 PV+5 FS	37,10	38,96	0,95	41,32	40,88	1,01
Tercem3000	37,28	38,13	0,98	38,70	39,27	0,99
TerC3	39,16	38,74	1,01	41,23	41,78	0,99

Tableau : Rapport entre les valeurs mesurées et prédites de module d'élasticité (Euro)

	Mesuré 28 j (GPa)	Prédit 28 j (GPa)	(Mesuré/Prédit) 28 j	Mesuré 91 j (GPa)	Prédit 91 j (GPa)	(Mesuré/Prédit) 91 j
Tém.0,45	34,41	30,97	1,11	36,08	32,19	1,12
0,45-15PV	40,50	29,82	1,36	43,10	31,21	1,38
0,45-20PV	37,40	29,67	1,26	41,80	32,48	1,29
0,45-25PV	34,97	28,48	1,23	38,92	31,08	1,25
20 PV+5 FS	37,10	31,87	1,16	41,32	33,45	1,24
Ter cem3000	37,28	31,19	1,20	38,70	32,13	1,20
TerC3	39,16	31,70	1,24	41,23	34,18	1,21

Tableau : Rapport entre les valeurs mesurées et prédites de module d'élasticité (CAN A23.3-M84)

	Mesuré 28 j (GPa)	Prédit 28 j (GPa)	(Mesuré/Prédit) 28 j	Mesuré 91 j (GPa)	Prédit 91 j (GPa)	(Mesuré/Prédit) 91 j
Tém.0,45	34,41	37,87	0,91	36,08	39,34	0,92
0,45-15PV	40,50	36,45	1,11	43,10	38,15	1,13
0,45-20PV	37,40	36,27	1,03	41,80	39,70	1,05
0,45-25PV	34,97	34,80	1,00	38,92	38,00	1,02
20 PV+5 FS	37,10	38,96	0,95	41,32	40,88	1,01
Ter cem3000	37,28	38,13	0,98	38,70	39,27	0,99
TerC3	39,16	38,74	1,01	41,23	41,78	0,99

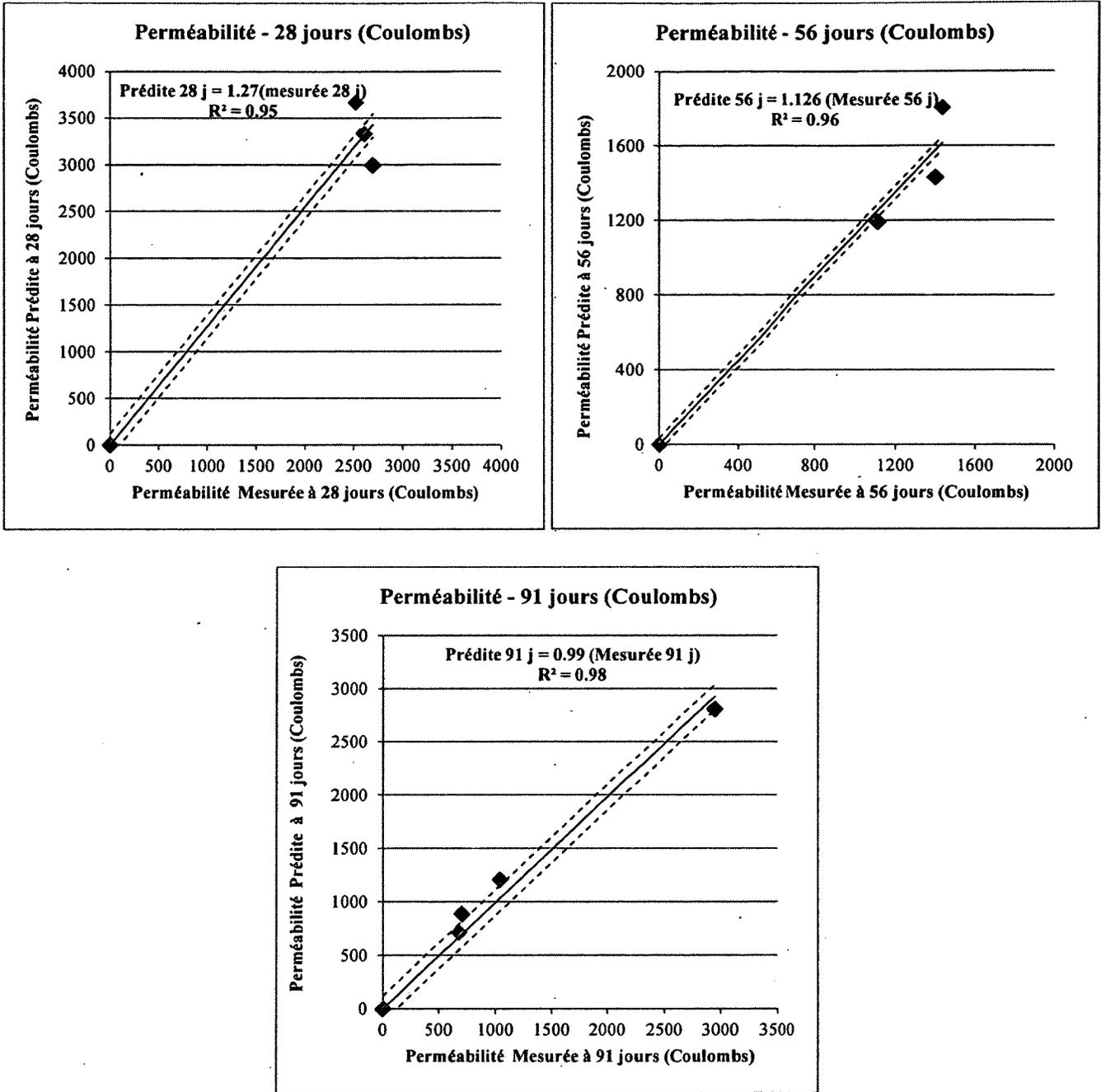


Figure : Validation des valeurs mesurées de perméabilité de la phase 2 avec les modèles proposés

Tableau : Résistance des bétons binaires exposés à l'écaillage

No. de cycles	La perte de masse (gm/m ²)							
	Tém.0.45		15PV		20PV		25PV	
	Quantité	Côté visuel	Quantité	Côté visuel	Quantité	Côté visuel	Quantité	Côté visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	58	1a	439	1b	182	1a	255	1a
21	79	1a	525	1b	737	1b	666	1b
35	109	1a	662	1b	1276	1b	1166	1b
56	147	1a	916	1b	2018	1b	1474	1b

Tableau : Résistance des bétons ternaires exposés à l'écaillage

No. de cycles	La perte de masse (gm/m ²)							
	Tém.0.45		20PV+5FS		Tercem3000		TerC3	
	Quantité	Côté visuel	Quantité	Côté visuel	Quantité	Côté visuel	Quantité	Côté visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	58	1a	197	1a	221	1a	667	1b
21	79	1a	637	1b	540	1b	1048	1b
35	109	1a	936	1b	728	1b	1155	1b
56	147	1a	1084	1b	833	1b	1236	1b

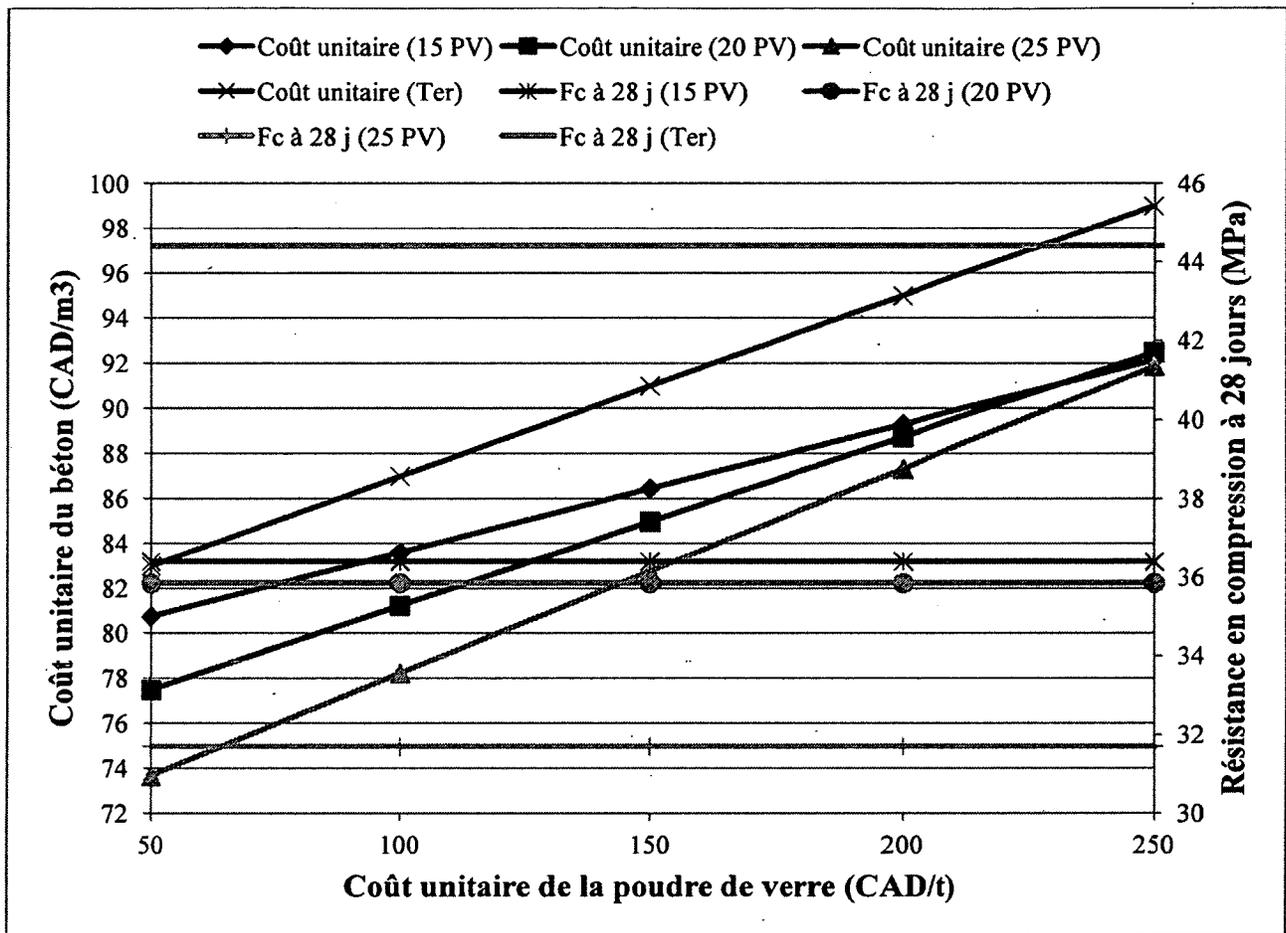


Figure : Relation entre la résistance en compression à 28 jours et le coût unitaire du béton

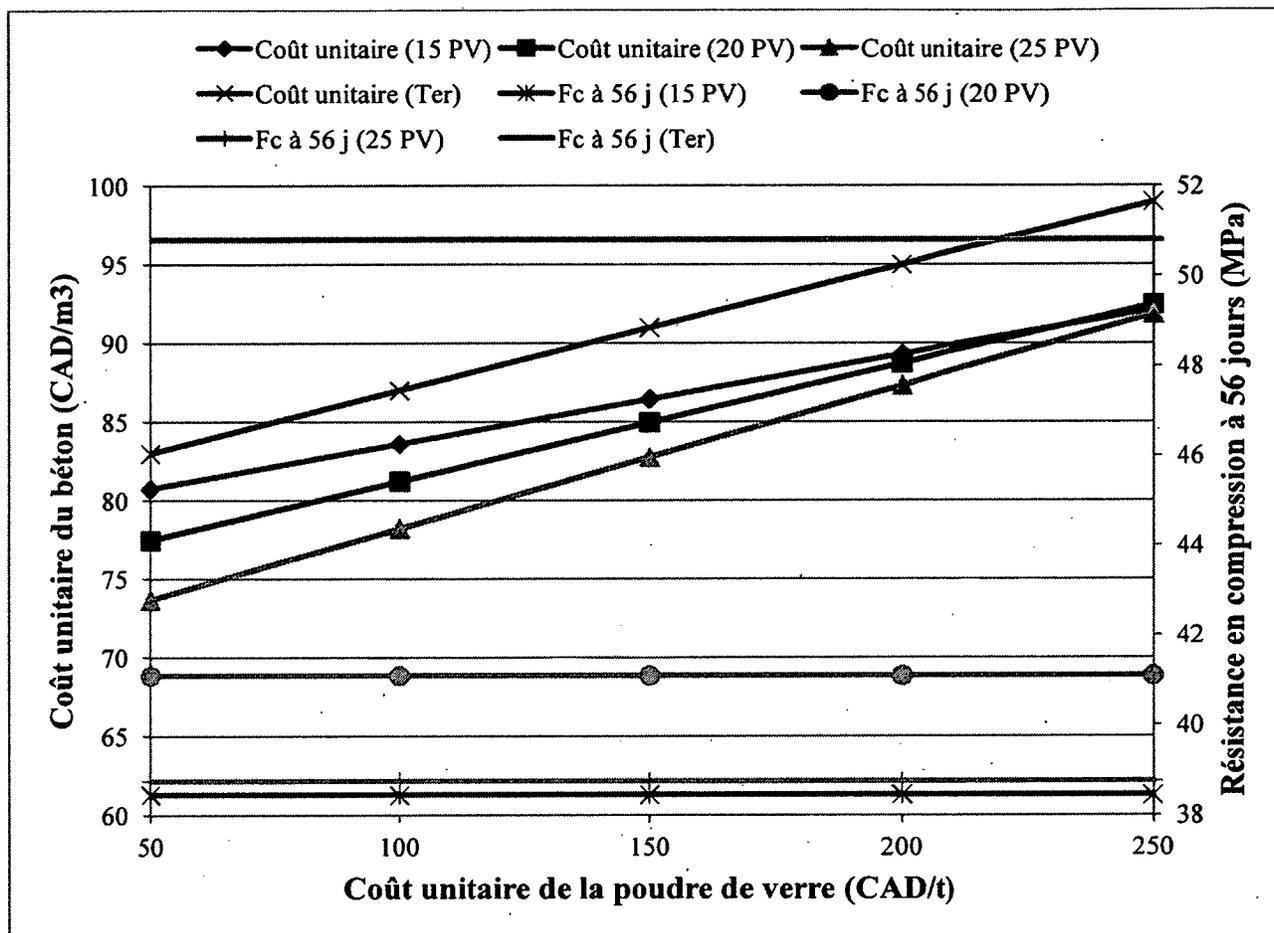


Figure : Relation entre la résistance en compression à 56 jours et le coût unitaire du béton

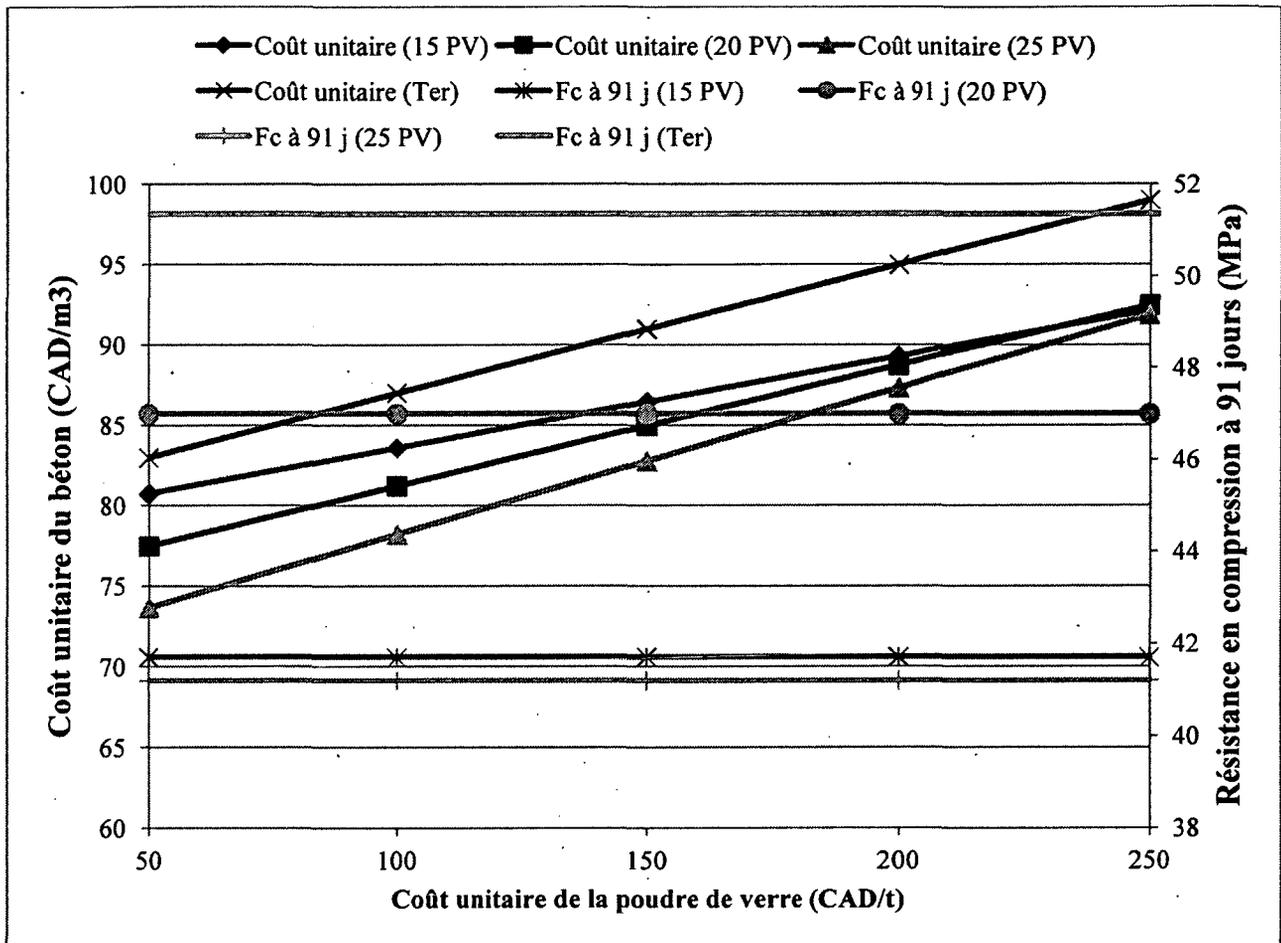


Figure : Relation entre la résistance en compression à 91 jours et le coût unitaire du béton