

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de Génie
Département de Génie Civil

DÉVELOPPEMENT DES BÉTONS SEMI AUTOPLAÇANTS À
RHÉOLOGIE ADAPTÉE POUR DES INFRASTRUCTURES

Mémoire de maîtrise
Spécialité : Génie civil

Cristian Daniel SOTOMAYOR CRUZ

Sous la supervision de:
Kamal KHAYAT (Directeur)
Ammar YAHIA (Co-directeur)

Sherbrooke (Québec) Canada

Mai 2012

TU-2241



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: 978-0-494-91051-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-91051-1

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

Au cours des dernières décennies, les infrastructures canadiennes et québécoises comportent plusieurs structures en béton armé présentant des problèmes de durabilité dus aux conditions climatiques sévères, à la mauvaise conception des structures, à la qualité des matériaux, aux types des bétons choisis, aux systèmes de construction ou à l'existence d'événements incontrôlables. En ce qui concerne le choix du béton pour la construction des infrastructures, une vaste gamme de béton divisée en deux principaux types peut être utilisée: le béton conventionnel vibré (BCV) et le béton autoplaçant (BAP). Dans le cas d'un BCV, la consolidation inadéquate par vibration a été un problème récurrent, occasionnant des dommages structuraux. Ceci a conduit à une réduction de la durabilité et à une augmentation du coût d'entretien et de réparation des infrastructures. Rien que l'utilisation d'un BAP a des avantages tels que l'élimination de la vibration, la réduction des coûts de main d'œuvre et l'amélioration de la qualité des structures, néanmoins, le coût initial d'un BAP par rapport à un BCV ne permet pas encore de généraliser son utilisation dans l'industrie de la construction. Ce mémoire présente la conception d'une nouvelle gamme de béton semi-autoplaçant pour la construction des infrastructures (BSAP-I) exigeant une vibration minimale. Il s'agit de trouver un équilibre optimal entre la rhéologie et le coût initial du nouveau béton pour conférer une bonne performance structurale et économique aux structures.

Le programme expérimental établi a premièrement permis d'évaluer la faisabilité d'utilisation des BSAP-I pour la mise en place des piliers d'une infrastructure de pont à Sherbrooke. En plus, l'utilisation d'un plan d'expériences a permis l'évaluation de trois paramètres de formulation sur les propriétés des mélanges de BSAP-I à l'état frais et durci. Finalement, l'évaluation de la performance des BSAP-I optimisés à travers une caractérisation complète des propriétés mécaniques et de la durabilité a été réalisée.

À la suite de cette étude, les résultats obtenus nous permettent de conclure que :

- L'utilisation d'un BSAP-I avec un gros granulat de 5 – 14 mm, des rapports $E/L = 0,37$ et $S/G = 0,52$ et une teneur en air de 6 à 9% a été possible en conférant un équilibre optimal fluidité / stabilité à l'état frais, ainsi qu'un niveau de thixotropie adéquate au chantier

permettant d'optimiser la conception du coffrage des piliers de pont et de conférer des qualités de surfaces très acceptables de ces infrastructures.

- La méthode adaptée pour l'essai L-Box contenant 2 barres et une vibration de 5 secondes a permis de bien caractériser la capacité de remplissage d'un BSAP-I.
- L'utilisation d'un plan factoriel 2^3 a permis d'obtenir des modèles statistiques fiables, capables de prédire les propriétés rhéologiques à l'état frais et les résistances en compression des BSAP-I avec des dosages en liant entre 370 et 420 kg/m³, des rapports E/L entre 0,34 et 0,40 et S/G entre 0,47 et 0,53.
- Des mesures de vitesse d'écoulement T_{40} d'un BSAP-I sont très semblables à celles d'un BAP. En plus, des valeurs T_{40} montrent une bonne corrélation linéaire avec celles de T_{400} mesurés dans la boîte L-Box.
- À la frontière du BAP et du BCV, une bande rhéologique possédant un τ_0 entre 30 et 320 Pa et un η entre 10 et 140 Pa.s a été trouvée pour la conception optimale des BSAP-I.
- Les BSAP-I optimisés ont également conféré une très bonne performance à l'état frais, en permettant maintenir un bon équilibre entre la rhéologie et la stabilité dans le temps, lorsqu'on utilise une énergie de vibration minimale pour amorcer son écoulement.
- À l'état durci Les BSAP-I ont conféré une bonne performance présentant des résistances mécaniques élevées et des niveaux négligeables de pénétration aux ions chlorures, de perte de masse par écaillage et des attaques par le gel/dégel.
- L'utilisation des ciments combinés possédant de la fumée de silice, du laitier et de la cendre volante ont permis améliorer le comportement rhéologique et minimiser le retrait par séchage des BSAP-I dans le temps.

Mots-clés : Béton autoplaçant (BAP), capacité de remplissage, pression hydrostatique, rhéologie, seuil de cisaillement, thixotropie, maniabilité.

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été entrepris dans le cadre de la chaire de recherche industrielle CRNSG dirigée par M. Kamal H. Khayat et qui porte sur les bétons fluides à haute performance à rhéologie adaptée.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, le Prof. Kamal H. Khayat, pour son soutien financier, son savoir-faire, ses précieux conseils scientifiques et ses directives pertinentes tout au long de ce projet de recherche.

J'exprime davantage mes remerciements à mon co-directeur, le Prof. Ammar Yahia, pour ses conseils très appréciés et son suivi soutenu de recherche.

Je remercie tout le personnel du groupe de recherche sur le ciment et le béton de l'université de Sherbrooke qui ont contribué à ce mémoire. Mes remerciements vont particulièrement à Rajko Vojnovic, Johan Gass, Sylvain Roy, Denis Bolduc, et Madame Guislaine Luc pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et pour leur collaboration.

Je tiens tout particulièrement à remercier Olivier Bonneau, Ahmed Omran et Dimitri Feys de leurs savoirs faire, et leurs conseils techniques conférés pour l'élaboration des deux premières phases de mon projet de maîtrise. Je remercie davantage Aly Hussein Abdalla et José Quiroz de leurs amitiés et de leur soutien conférés tout au long de mes travaux au laboratoire et pendant la rédaction de mon mémoire.

À tous mes professeurs des cours suivis dans mon programme de maîtrise en génie civil qui m'ont aidé à consolider mes connaissances concernant le matériau le plus utilisé dans l'industrie de la construction: le béton.

Je tiens enfin à remercier ma famille pour leurs encouragements et leur soutien. Je pense plus particulièrement à ma femme Maria Luisa, ma petite Daniela et mes parents au Pérou. Merci pour vos attentions lorsque je reviens à la maison à Montréal et vos coups de téléphone pour m'encourager dans mon projet de maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2	SITUATION DU PROBLÈME.....	2
1.3	OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	3
1.4	ORGANISATION DU MÉMOIRE.....	4
2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
2.1	MISE EN ŒUVRE DES INFRASTRUCTURES.....	5
2.2	DEVIS TECHNIQUES.....	6
2.3	ÉTUDE DES BÉTONS EXISTANTS.....	9
2.3.1	Béton conventionnel vibré (BCV).....	10
2.3.1.1	Historique.....	10
2.3.1.2	Avantages par rapport au BAP.....	10
2.3.1.3	Caractérisation du BCV.....	11
2.3.1.4	Principe de la consolidation.....	12
2.3.1.5	Consolidation par vibration mécanique.....	12
2.3.1.6	Limitations de la consolidation par vibration.....	14
2.3.1.7	Recommandations.....	17
2.3.2	Béton autoplaçant (BAP).....	17
2.3.2.1	Historique du BAP.....	18
2.3.2.2	Avantages par rapport au BCV.....	19
2.3.2.3	Formulation du BAP.....	20
2.3.2.4	Caractérisation du BAP.....	23
2.3.2.5	Limitations.....	25
2.3.2.6	Conclusion.....	27
2.4	RHÉOLOGIE DU BÉTON.....	27
2.4.1	Définition de la rhéologie.....	27
2.4.2	La rhéologie du béton frais.....	29
2.4.3	Comportement rhéologique et modèles multi-échelles.....	29
2.4.4	Mesure de la rhéologie du béton.....	32
2.4.5	La thixotropie du béton.....	33
2.5	ÉTUDE SUR LA CONCEPTION D'UN BÉTON SEMI AUTO-PLAÇANT (BSAP).....	36
2.6	CONCLUSION.....	38
3	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURE D'ESSAIS.....	39
3.1	INTRODUCTION.....	39
3.2	PRÉSENTATION DU PLAN EXPÉRIMENTAL.....	39
3.3	MATÉRIAUX UTILISÉS.....	42

3.3.1	Ciment	42
3.3.2	Granulats fins	43
3.3.3	Gros granulats	43
3.3.4	Eau de gâchage.....	44
3.3.5	Adjuvants chimiques	44
3.4	FORMULATIONS DES BÉTONS SEMI-AUTOPLAÇANTS BSAP-I	45
3.4.1	Phase III.1 Faisabilité (Essais préliminaires) d'un BSAP-I à l'usine et au chantier 45	
3.4.2	Phase III.2A Plan d'expériences 2 ³	46
3.4.2.1	Principe du plan d'expériences	46
3.4.2.2	Le plan d'expériences choisi.....	47
3.4.2.3	Mélanges de BSAP-I étudiés	49
3.4.2.4	Transformation des paramètres en valeurs codées.....	50
3.4.3	Phase III.2B Caractérisation complète des mélanges optimisés	51
3.5	PROCÉDURE DE MALAXAGE	52
3.6	PROCÉDURES D'ESSAIS	53
3.6.1	Étalement.....	53
3.6.2	T ₄₀	54
3.6.3	J-Ring	54
3.6.4	Capacité de remplissage dans la L-Box	55
3.6.5	Temps d'écoulement L-Box.....	55
3.6.6	Capacité de remplissage dans la boîte de remplissage.....	56
3.6.7	Masse volumique.....	56
3.6.8	Teneur en air.....	57
3.6.9	Rhéomètre	57
3.6.10	Thixotropie au repos avec le scissomètre	58
3.6.11	Colonne de ségrégation	60
3.6.12	Ségrégation sur table vibrante	61
3.6.13	Pression latérale sur le coffrage.....	63
3.6.14	Prélèvement des échantillons et murissement	64
3.6.15	Résistance à la compression	65
3.6.16	Module d'élasticité	66
3.6.17	Retrait par séchage.....	66
3.6.18	Écaillage	67
3.6.19	Gel / dégel.....	68
3.6.20	Perméabilité aux ions chlore	69
3.6.21	Réseau de bulles d'air.....	70
4	PRÉSENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	71

4.1	PHASE III.1 A ET B ESSAIS PRÉLIMINAIRES DE CARACTÉRISATION DES BSAP-I À L'USINE ET AU CHANTIER	71
4.1.1	Perte d'étalement – J-Ring	72
4.1.2	Capacité de remplissage dans L-box et la boîte de remplissage	74
4.1.3	Viscosité plastique – Seuil de cisaillement	76
4.1.4	Ségrégation statique	77
4.1.5	Pression latérale dans le coffrage	77
4.1.6	Thixotropie au repos.....	79
4.1.7	Résistance à la compression	80
4.1.8	Module d'élasticité	81
4.1.9	Perméabilité aux ions chlores.....	82
4.1.10	Mesure de l'espacement des bulles d'air entraîné.....	83
4.1.11	Résistance au gel/dégel.....	83
4.1.12	Résistance à l'écaillage.....	83
4.2	CHOIX DU BSAP-I OPTIMAL POUR LA COULÉE DES PILIERS DE PONT	83
4.3	PHASE III.1C CARACTÉRISATION ET INSTRUMENTATION DU BSAP-I AU CHANTIER	85
4.3.1	Présentation et discussion des données	85
4.4	CONCLUSIONS.....	88
4.5	PHASE III.2A PLAN D'EXPÉRIENCES	89
4.5.1	Présentation des résultats	89
4.5.2	Traitement statistique des données.....	89
4.5.3	Modèles statistiques	94
4.5.4	Fiabilité des résultats.....	95
4.5.5	Validation des modèles statistiques	96
4.5.6	Exploitation des modèles statistiques.....	99
4.5.7	Perte d'étalement dans le temps	103
4.5.8	T_{40} et étalement en fonction du rapport E / L.....	104
4.5.9	Corrélation T_{40} de l'étalement et T_{400} de la L-Box.....	105
4.5.10	Capacité de remplissage avant et après vibration.....	106
4.5.11	Viscosité plastique – Seuil de cisaillement.....	107
4.5.12	Ségrégation des cylindres vibrés	108
4.5.13	Résistance à la compression	109
4.5.14	Analyse coût / performance des BSAP-I.....	110
4.5.15	Conclusion.....	113
4.6	PHASE III.2B OPTIMISATION DES BSAP-I	114
4.6.1	Présentation des résultats à l'état frais et durci	115
4.6.2	Paramètres d'ouvrabilité	115
4.6.3	Capacité de remplissage dans la L-Box	116
4.6.4	Viscosité plastique et seuil de cisaillement.....	118
4.6.5	Thixotropie au repos.....	119

4.6.6	Ségrégation statique	119
4.6.7	Résistance à la compression.....	120
4.6.8	Module d'élasticité.....	121
4.6.9	Résistance à l'écaillage	121
4.6.10	Pénétrabilité aux ions chlore	122
4.6.11	Durabilité aux cycles gel / dégel rapides	123
4.6.12	Retrait par séchage.....	123
4.6.13	Résistance en flexion.....	124
5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	125
6	BIBLIOGRAPHIE	129

LISTE DE FIGURES

FIGURE 2.1 DESCRIPTION DES ELEMENTS STRUCTURAUX D'UNE INFRASTRUCTURE DE PONT EN BETON.....	6
FIGURE 2.2 MESURE DE L'AFFAISSEMENT DU BETON AU CONE D'ABRAMS.....	11
FIGURE 2.3 COMPARAISON DES QUALITES DE BETON	12
FIGURE 2.4 CONSOLIDATION DU BETON PAR VIBRATION INTERNE.....	13
FIGURE 2.5 AIGUILLE VIBRANTE AU MOTEUR ÉLECTRIQUE [ACI 309.R-05]	13
FIGURE 2.6 MONTAGE DE VIBRATEUR EXTERNE DANS UN COFFRAGE DE BOIS [ACI 309.R-05] .	14
FIGURE 2.7: RAPPORT ENTRE L'EFFORT DE VIBRATION, LA DENSITÉ ET LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION D'UN BÉTON CONVENTIONNEL CONTENANT 2.5% D'AIR ATTRAPÉ [TYMKOWICZ, 1996].....	16
FIGURE 2.8 : RAPPORT ENTRE L'EFFORT DE VIBRATION, LA DENSITÉ, LE VOLUME DE PORES ET LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION D'UN BÉTON CONTENANT ENTRE 5 À 6% D'AIR ENTRAÎNÉ [TYMKOWICZ, 1996].	16
FIGURE 2.9 VOLUME D'APPLICATION DE BAP AU JAPON (MILES DE M ³) [NAGATAKI, 2010] ..	18
FIGURE 2.10 COMPOSITION D'UN BCV ET D'UN BAP [TURCRY, 2004].....	20
FIGURE 2.11 CRITERES ETABLIS POUR OBTENIR UNE BONNE DEFORMABILITE, UNE STABILITE ACCEPTABLE ET UN FAIBLE RISQUE DE BLOCAGE [KHAYAT, 1999].....	21
FIGURE 2.12 RAPPORT ENTRE L'AFFAISSEMENT ET L'ÉTALEMENT DES BÉTONS FLUIDES [KHAYAT, 1999].....	24
FIGURE 2.13 : PROFIL DE VITESSE POUR UN ÉCOULEMENT DE CISAILLEMENT SIMPLE D'UN LIQUIDE NEWTONIEN ENTRE DEUX PLANS. LE PLAN SUPÉRIEUR EST EN MOUVEMENT À VITESSE V CONSTANTE [HUANG, 2006].....	28
FIGURE 2.14 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES DIFFÉRENTS CORPS FLUIDES [WALLEVIK, 2010].....	31
FIGURE 2.15 ÉCRASEMENT DE LA STRUCTURE ET RESTRUCTURATION DANS LE TEMPS [44].....	34
FIGURE 2.16 DIAGRAMME DE PRESSON SUR LE COFFRAGE D'UN BAP [ASSAD ET COLL, 2005].	34
FIGURE 2.17 REPARTITION DES GRANULATS APRES VIBRATION DU BSAP [LECLERC, 2010].....	37
FIGURE 2.18 T ₈₀ NÉCESSAIRE POUR OBTENIR 80% DE NIVEAU DE REMPLISSAGE [LECLERC, 2010]	38
FIGURE 2.19 PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE DU BSAP [LECLERC, 2010]	38
FIGURE 3.1 COURBE GRANULOMÉTRIQUE DU SABLE	43
FIGURE 3.2 COURBE GRANULOMÉTRIQUE DE LA PIERRE DE 5 - 14 MM (FUSEAU 7 ASTM C33) .	44
FIGURE 3.3 COURBE GRANULOMÉTRIQUE DE LA PIERRE DE 5 - 20 MM (FUSEAU 57 ASTM C33)	44
FIGURE 3.4 DOMAINE EXPÉRIMENTAL DU PLAN D'EXPÉRIENCES 2 ³	49
FIGURE 3.5 MESURE DE L'ÉTALEMENT DU BÉTON FRAIS.....	54
FIGURE 3.6 MESURE DE J-RING DU BÉTON FRAIS.....	55
FIGURE 3.7 MESURE DE LA CAPACITÉ DE REMPLISSAGE DANS LA BOÎTE L-BOX	56
FIGURE 3.8 MESURE DE LA TENEUR EN AIR DU BÉTON FRAIS	57

FIGURE 3.9 MESURE DE LA RHÉOLOGIE DU BÉTON FRAIS AVEC LE RHÉOMÈTRE ICAR	58
FIGURE 3.10 ESSAI DE THIXOTROPIE AU REPOS [OMRAN, 2010]	59
FIGURE 3.11 COLONNE DE L'ESSAI DE SÉGRÉGATION [KHAYAT, 2002]	61
FIGURE 3.12 CONFECTION DES CYLINDRES SUR TABLE VIBRANTE	62
FIGURE 3.13 REPÉRAGE DES GRANULATS ≥ 5 MM SUR PAPIER TRANSPARENT	62
FIGURE 3.14 EXEMPLE DE RÉPARTITION DES GRANULATS APRÈS VIBRATION DU BÉTON	63
FIGURE 3.15 MESURE DE LA PRESSION LATÉRALE SUR LE COFFRAGE À L'ÉCHELLE DE LABORATOIRE	64
FIGURE 3.16 ESSAI DE RÉSISTANCE EN COMPRESSION DU BÉTON	66
FIGURE 3.17 MESURE DU RETRAIT PAR SÉCHAGE	67
FIGURE 3.18 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL DE MESURE DE LA PERMÉABILITÉ À L'EAU UTILISÉ À L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE [NOTES DU COURS DE DURABILITÉ, 2010]	69
FIGURE 4.1 PERTE D'ÉTALEMENT DES BSAP-I À L'USINE (SIMULATION DU TRANSPORT - PHASE III.1A)	73
FIGURE 4.2 PERTE D'ÉTALEMENT DES BSAP-I À L'USINE (APRÈS POMPAGE - PHASE III.1B)	74
FIGURE 4.3 CAPACITÉ DE REMPLISSAGE DANS LA L- BOX ET LA BOÎTE TRANSPARENTE (AVANT ET APRÈS POMPAGE - PHASE III.1B)	75
FIGURE 4.4 ÉTALEMENT – SEUIL DE CISAILLEMENT DES BSAP-I (10 ET 70 MIN - PHASE III.1A)	76
FIGURE 4.5 ÉVOLUTION DE LA PRESSION LATÉRALE DU BSAP-I SUR LA COLONNE PVC DE 1100MM D'HAUTEUR ET 200 MM EN DIAMÈTRE (PHASE III.1B)	78
FIGURE 4.6 DISTRIBUTION DE LA PRESSION LATÉRALE DU BSAP-I SUR LA COLONNE PVC DE 1100MM D'HAUTEUR ET 200 MM EN DIAMÈTRE (PHASE III.1B)	78
FIGURE 4.7 COMPORTEMENT THIXOTROPIQUE AU REPOS (APRÈS POMPAGE - PHASE III.1B)	79
FIGURE 4.8 RÉSULTATS DE RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES CYLINDRES DE BSAP AVEC DIFFÉRENTS NOMBRE DE PIQUAGES (PHASE III.1A ET PHASE III.1B)	80
FIGURE 4.9 RÉSULTATS DE DISPERSION D2s% DES CYLINDRES POUR CHAQUE MÉLANGE DE BSAP AVEC DIFFÉRENTS NOMBRE DE PIQUAGES (PHASE III.1A ET PHASE III.1B)	81
FIGURE 4.10 RÉSULTATS PRÉDITS ET MESURÉS DU MODULE D'ÉLASTICITÉ DES BSAP (PIII.1B)	82
FIGURE 4.11 RÉSULTATS DE PERMÉABILITÉ AUX IONS CHLORE POUR LES BSAP-I (PIII.1B)	82
FIGURE 4.12 COMPORTEMENT THIXOTROPIQUE DU BSAP-I AVEC MSA DE 14 MM AU CHANTIER	87
FIGURE 4.13 DISTRIBUTION DE LA PRESSION DANS LE PILIER DU PONT (PHASE III.1C)	87
FIGURE 4.14 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES ET MESURÉES POUR LE DOSAGE EN SP (%)	96
FIGURE 4.15 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES ET MESURÉES POUR LE T40 (SEC) À 10 MINUTES	96
FIGURE 4.16 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES ET MESURÉES POUR LE T400 À 10 MINUTES (SEC)	97
FIGURE 4.17 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES POUR LA CAPACITÉ DE REMPLISSAGE APRÈS VIBRATION ET À 10 MINUTES (%)	97

FIGURE 4.18 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES ET MESURÉES POUR LA VISCOSITÉ PLASTIQUE (PA.S)	98
FIGURE 4.19 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES ET MESURÉES POUR LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION À 28 JOURS (MPA)	98
FIGURE 4.20 RÉSULTATS DES VALEURS PRÉDITES ET MESURÉES POUR LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION À 56 JOURS (MPA)	99
FIGURE 4.21 DIAGRAMMES ISO-RÉPONSES POUR LE DOSAGE EN SP (%).....	100
FIGURE 4.22 DIAGRAMME ISO-RÉPONSE POUR LE TEMPS D'ÉCOULEMENT T ₄₀	100
FIGURE 4.23 DIAGRAMMES ISO-RÉPONSES DE LA VISCOSITÉ PLASTIQUE (PA.S) COMBINÉES AVEC LE DOSAGE EN SP (%).....	101
FIGURE 4.24 DIAGRAMMES ISO-RÉPONSES DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION À 28 ET 56 JOURS (MPA) COMBINÉES AVEC LE DOSAGE EN SP (%)	102
FIGURE 4.25 RÉSULTATS DE L'ÉTALEMENT DE 18 BSAP-I MESURÉS À 10 ET 70 MINUTES	103
FIGURE 4.26 MESURE T ₄₀ À 10 MINUTES EN FONCTION DE L'ÉTALEMENT ET DU RAPPORT E/L.	104
FIGURE 4.27 RELATION ENTRE LES TEMPS T ₄₀ ET T ₄₀₀ À 10 MINUTES EN FONCTION DU RAPPORT E/L	105
FIGURE 4.28 RÉSULTATS DE CAPACITÉ DE REMPLISSAGE À 10 MINUTES, AVANT ET APRÈS VIBRATION.....	106
FIGURE 4.29 RÉSULTATS DE SEUIL DE CISAILLEMENT ET VISCOSITÉ PLASTIQUE MESURÉS À 10 MINUTES	107
FIGURE 4.30 RÉSULTATS DE MESURE DE L'ÉPAISSEUR DU MORTIER DES CYLINDRES DE 100 x 200 MM VIBRÉS À 5, 10 ET 20 SECONDES SUR TABLE VIBRANTE POUR L'ANALYSE DE SÉGRÉGATION STATIQUE.....	108
FIGURE 4.31 RÉSULTATS DE RÉSISTANCE DES CYLINDRES DE BSAP-I AUX ÂGES DE 1, 28 ET 56 JOURS	109
FIGURE 4.32 RELATION DU COÛT PAR M ³ DES BSAP-I PAR RAPPORT AU MÉLANGE CENTRAL (M15).....	110
FIGURE 4.33 COMPORTEMENT THIXOTROPIQUE AU REPOS DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)	119
FIGURE 4.34 RÉSULTATS DE RÉSISTANCE DES CYLINDRES DE BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)	120
FIGURE 4.35 RÉSULTATS DE MODULE D'ÉLASTICITÉ ES BSAP-I (PHASE III.2B)	121
FIGURE 4.36 PÉNÉTRABILITÉ DES IONS CHLORES DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)	122
FIGURE 4.37 RETRAIT PAR SÉCHAGE DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B).....	123
FIGURE 4.38 RÉSISTANCE EN FLEXION DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B).....	124

LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU 1.1 PRODUCTION ANNUELLE MONDIALE DES MATÉRIAUX, EN 2007, EN TONNES (TONNES METRIQUES) [AÏTCIN, 2007].....	1
TABLEAU 2.1 DEVIS TECHNIQUES DES BÉTONS DE MASSE NORMALE POUR LES OUVRAGES D'ART [MTQ, 2007].	7
TABLEAU 2.2 RAPPORT MAXIMAL EAU/LIANT EN MASSE DES BÉTONS POUR DES PONTS ROUTIERS [CAN, 2006]	8
TABLEAU 2.3 DEVIS TECHNIQUES DU BÉTON POUR DES PILIERS DE PONT	9
TABLEAU 2.4 DEVIS TECHNIQUES DU BÉTON POUR DES INFRASTRUCTURES.....	9
TABLEAU 2.5 CARACTÉRISTIQUES DE MANIABILITÉ DES BCV UTILISÉS AU CHANTIER [ACI 309.R-05].....	11
TABLEAU 2.6 CONSOMMATION DU BAP EN EUROPE [NAGATAKI, 2010]	19
TABLEAU 2.7 CARACTÉRISTIQUES DE MANIABILITÉ, MÉTHODES D'ESSAI ET VALEURS RECOMMANDÉES [HWANG ET COLL., 2006].....	26
TABLEAU 2.8 MODÈLES RHÉOLOGIQUES DE SUSPENSIONS [FERRARIS, 1999].....	30
TABLEAU 2.9 PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES [KHAYAT, 2011].	31
TABLEAU 2.10 IDENTIFICATION DES COMPORTEMENTS ET VALIDITÉS DES MODÈLES [YAMMINE, 2007 À PARTIR DES DONNÉES DE TOUTOU, 2003].....	32
TABLEAU 2.11 ÉQUATIONS POUR CALCULER LA PRESSION DU BÉTON	35
TABLEAU 3.1 CAHIER DE CHARGE À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI	41
TABLEAU 3.2 COMPOSITION CHIMIQUE ET PHYSIQUE DES CIMENTS	42
TABLEAU 3.3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS.....	43
TABLEAU 3.4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ADJUVANTS CHIMIQUES (EUCLID CANADA).....	45
TABLEAU 3.5 DOSAGE PAR M3 DES BSAP-I PROPOSÉS (PHASE III.1).....	46
TABLEAU 3.6 PARAMÈTRES DES BSAP-I PROPOSÉS (PHASE III.2A).....	51
TABLEAU 3.7 PARAMÈTRES DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B).....	52
TABLEAU 3.8 : PROCÉDURE DE MALAXAGE DU BSAP-I À L'USINE ET AU LABORATOIRE.....	53
TABLEAU 3.9 : CLASSEMENT DES INDICES DE RESTRUCTURATION AU REPOS POUR LE SCSOMÈTRE (PV) ET LE RHÉOMETRE [OMRAN ET COLL., 2011].....	60
TABLEAU 3.10 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DES BAP, BCV ET BSAP-I.....	65
TABLEAU 3.11 ÉVALUATION QUALITATIVE DE SURFACE ÉCAILLÉE [ASTM C 672-03].....	68
TABLEAU 3.12 NIVEAU DE PENETRABILITÉ AUX IONS CHLORE [ASTM C1202-97]70	70
TABLEAU 4.1 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I (PHASE III.1A, B).....	71
TABLEAU 4.2A RÉSULTATS DES RÉSISTANCES F'C (PHASE III.1A ET B).....	72
TABLEAU 4.2B RÉSULTATS DE DURABILITÉ (PHASE III.1A ET B).....	72

TABLEAU 4.3 RÉSULTATS DE SÉGRÉGATION STATIQUE MESURÉE AVEC LA COLONNE DE SÉGRÉGATION	77
TABLEAU 4.4 RÉCAPITULATION DES EFFETS DE CHAQUE PROPRIÉTÉ MESURÉE À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI DES BSAP-I (PHASE III.1A ET B)	84
TABLEAU 4.5 RÉSULTATS DE PROPRIÉTÉS FRAIS DU BSAP-I AVEC MSA 14 MM AU CHANTIER (PHASE III.1C).....	86
TABLEAU 4.6 DOSAGE DES BSAP-I (PHASE III.2A)	90
TABLEAU 4.7 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I À 10 MINUTES (PHASE III.2A)	91
TABLEAU 4.8 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I À 70 MINUTES (PHASE III.2A)	92
TABLEAU 4.9A MODÈLES STATISTIQUES OBTENUS A L'ÉTAT FRAIS (PHASE III.2A)	93
TABLEAU 4.9B MODÈLES STATISTIQUES OBTENUS A L'ÉTAT DURCI (PHASE III.2A)	93
TABLEAU 4.10 FIABILITÉ DES RÉPONSES MESURÉES (PHASE III.2A).....	95
TABLEAU 4.11 ANALYSE COÛT / PERFORMANCE DES BSAP-I.....	111
TABLEAU 4.12 DOSAGE PAR M ³ DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)	115
TABLEAU 4.13 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I OPTIMISÉS À 10 MINUTES (PHASE III.2B)	117
TABLEAU 4.14 RÉSULTATS À L'ÉTAT DURCI DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)	118

LISTE DE SYMBOLES

AC	Agent colloïdal
AEA	Agent entraîneur d'air
BCV	Béton conventionnel vibré
BAP	Béton autoplaçant
BAN	Béton autonivelant
BSAP	Béton semi-autoplaçant
BSAP-I	Béton semi-autoplaçant à rhéologie adaptée pour des infrastructures
τ_0	Seuil de cisaillement
η	Viscosité plastique
SP	Superplasifiant
NaCl	Chlorure de sodium
MSA	Taille maximale de granulats
NaOH	Chlorure de sodium
PVC	Polyvinyle chloride
PNS	Polynaphthalene sulfonates
PCE	Polycarboxylate
MTQ	Ministère des transports du Québec

Chapitre 1

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Depuis des siècles, le béton s'avère être le matériau le plus fiable dans l'industrie de la construction. Nous utilisons au-delà de deux fois plus de béton que l'ensemble des autres matériaux disponibles (tableau 1.1) pour la construction des structures de bâtiments, des ponts, des routes, des barrages, des réservoirs, etc. [Aïtcin, 2011]. Cette vaste utilisation du béton s'explique, non seulement par son coût relativement faible, sa facilité d'emploi au chantier ou sa vie utile significative par rapport au reste des matériaux disponibles, mais aussi par les exploits techniques qu'il possède en permettant d'accomplir les devis techniques de résistances mécaniques et de durabilité et en conférant un bon comportement coût/performance. Il n'est donc pas surprenant que le béton soit aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde.

L'utilisation du béton est diversifiée dans les champs d'activités spécialisées comme les bétons fibrés, les bétons de poudres réactives, les bétons légers, les bétons autoplaçants et récemment les **bétons semi-autoplaçants**. Ces bétons spéciaux font l'objet des travaux de recherche scientifique, afin de proposer des méthodes d'essai pour caractériser leurs propriétés. En plus, compte tenu du défi de développement durable pour réduire le taux d'émission de gaz à effet de serre dans la planète, le béton peut intégrer des matériaux sous-produits de l'industrie pour remplacer une partie du ciment utilisée dans sa formulation.

TABLEAU 1.1 PRODUCTION ANNUELLE MONDIALE DES MATÉRIAUX, EN 2007, EN TONNES (TONNES METRIQUES) [AÏTCIN, 2007].

Béton	~ 13 milliards
Ciment Portland	2.36 milliards
Acier	1.34 milliards
Charbon	6.5 milliards
Pétrole brut	~ 3.8 milliards
Blé	606.4 milliards
Sel	200 milliards
Sucre	162 millions

Au Canada, le béton a été utilisé depuis plus de cent ans pour la construction des réseaux d'infrastructures de ports, des routes, des barrages, des ponts, ainsi que d'autres ouvrages importants. Lorsque ces infrastructures ont été conçues et construites correctement, la durée de vie a normalement été de 50 à 75 ans ou plus. Néanmoins, plusieurs d'entre elles arrivent à la moitié de leur vie utile prédite et présentent des problèmes de durabilité dus aux conditions climatiques sévères, à la mauvaise conception structurale, à la qualité des matériaux, aux types de bétons utilisés, aux systèmes de construction ou à l'existence d'événements incontrôlables. Des milliards de dollars sont alors requis pour la réhabilitation des infrastructures à cause des détériorations associées à une mauvaise conception du béton (bétons de l'époque avaient une rhéologie mal adaptée pour une mise en place optimale et pour conférer des perméabilités plus faibles) [Gagné, 2011].

Au Québec, 50% des infrastructures de pont sur un total de 8500 atteint la moitié de leur vie utile, celles-ci présentant des problèmes de détérioration et dans certains cas du risque d'effondrement [Rhazi, 2012]. C'est par centaine que nous pouvons compter les structures ou les parties des structures de ponts, des ponceaux, des viaducs, et des stationnements multiétagés qui doivent être réparés ou reconstruits en raison de leur état avancé de détérioration. Dans la majorité des cas, les coûts de réparation et d'entretien des structures endommagées en viennent rapidement à dépasser leur coûts de construction [Gagné, 2011].

1.2 Situation du problème

En ce qui concerne la conception du béton pour des infrastructures, nous avons à date une vaste gamme de béton pouvant être divisée en deux principaux types: le béton conventionnel vibré (BCV) possédant une fluidité mesurée par l'essai d'affaissement entre 75 et 190 mm ou plus [ACI 309.R-05] et le béton autoplaçant (BAP) possédant une fluidité mesurée par l'essai d'étalement entre 550 mm et 650 mm ou plus [ACI 237.R, 2007].

Dans le cas du BCV, à cause de sa faible capacité de déformabilité, nous devons appliquer de l'énergie de consolidation au béton dans le coffrage afin de le conférer une structure plus homogène et compacte, des propriétés mécaniques adéquates, une bonne durabilité et, dans certains cas, une bonne qualité de finition de surface. La consolidation inadéquate du béton a été associée à une augmentation de la porosité et aux défauts de surface pour différents types

de structures. Ceci a conduit à la réduction de leur performance structurale et à l'augmentation de leur coût d'entretien à cause des travaux de réparation dans les zones affectées et dans certains cas à la démolition totale des structures [Forsssblad, 1995; Khayat, 1997].

Dans le cas du BAP, en améliorant sa capacité de déformabilité on parvient à lui conférer une bonne capacité de remplissage dans des coffrages sans avoir besoin d'appliquer de l'énergie de vibration. Ceci est traduit par des avantages [ACI 237.R, 2007], tels que :

- La réduction des coûts de main d'œuvre, des équipements vibrateurs, et des risques de mauvaise qualité des infrastructures;
- La réduction de travaux de finition pour assurer une bonne qualité de surface des structures;
- L'amélioration de la productivité de la construction par une hausse du taux de mise en place du béton et de la durée plus courte de construction de l'ouvrage;
- La réduction de l'impact environnemental à cause de l'utilisation des ajouts cimentaires et de l'élimination du bruit occasionnés par des vibrateurs.

Néanmoins, le BAP est normalement conçu avec une teneur en liant et en adjuvants chimiques relativement élevées, ce qui résulte en un coût initial relativement plus élevé par rapport au BCV, ne permettant pas alors de généraliser son utilisation dans l'industrie de la construction pour la mise en œuvre d'une variété des infrastructures. [Ghezal et coll., 2002].

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette étude entreprise dans le cadre de la chaire industrielle du CRNSG sur les bétons à haute performance fluides (BHPF) à rhéologie adaptée est la conception d'une nouvelle gamme de béton semi-autoplaçant à rhéologie adaptée pour des infrastructures (BSAP-I) exigeant une vibration minimale. Nous allons étudier le comportement rhéologique du nouveau BSAP-I afin de trouver un équilibre entre la maniabilité et le coût initial, pour le conférer une bonne performance structurale et économique. Ce béton doit accomplir davantage les devis techniques de la norme Canadienne CSA A.23 01 et ceux des partenaires de la chaire industrielle (Tableaux 2.3 et 2.4).

À partir des protocoles d'essais et d'échantillonnage validés dans le projet de maîtrise :
« Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-

autoplaçant (BSAP) pour le bâtiment », nous avons établi les objectifs spécifiques complémentaires des travaux de recherche mentionnés qui sont :

- Réalisation des essais préliminaires sur deux BSAP-I validés à l'usine et sur un BSAP-I approvisionné au chantier pour la mise en place des piliers de pont à Sherbrooke;
- Optimisation des mélanges de BSAP-I à travers un plan d'expériences pour évaluer l'influence des trois paramètres, es rapports eau/liant (E/L) et sable/granulats (S/G) ainsi que la teneur en liant, sur les propriétés à l'état frais et durci.
- Choix des mélanges optimaux pour réaliser une caractérisation complète des propriétés mécaniques et de la durabilité.

1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire de maîtrise est divisé en cinq chapitres :

Après cette introduction qui constitue **le premier chapitre**, **le deuxième chapitre** concerne l'étude bibliographique sur les devis techniques pour la construction des infrastructures, les avantages et les limitations ainsi que la rhéologie des bétons existants. Finalement un aperçu sur la conception du béton semi-autoplaçant (BSAP) entreprise dans la première partie de cette étude pour établir les protocoles d'essai et d'échantillonnage de ce nouveau béton est présenté.

Le troisième chapitre est consacré à la description du programme expérimental, les matériaux utilisés, les formulations ainsi que les protocoles d'essais utilisés. Ces protocoles sont tirés du projet sur BSAP mentionné au deuxième chapitre.

Le quatrième chapitre présente les résultats, l'analyse et la discussion des résultats sur les essais préliminaires des BSAP-I à l'usine et au chantier pour la mise en place des piliers de pont à Sherbrooke. En plus, des modèles statistiques établis pour la capacité de remplissage, les paramètres rhéologiques τ_0 et η , l'analyse coût/performance et la caractérisation des BSAP-I optimaux sont également présentés.

Le cinquième chapitre résume les conclusions tirées de cette étude et les recommandations concernant les perspectives pour des recherches futures sur cette classe de béton.

Chapitre 2

2 Revue bibliographique

2.1 Mise en œuvre des infrastructures

La construction des infrastructures doit être entreprise sous un contexte d'équilibre raisonnable entre les considérations sociales, environnementales et économiques pour assurer un développement moderne et durable. Des routes, des ponts, des réseaux portuaires ou des aéroports sont construites années après années pour faciliter le transport et la communication de la population. En plus, pour faciliter l'approvisionnement d'eau potable, l'enlèvement et le traitement des déchets et des eaux usées. Cette information permet aux propriétaires, aux concepteurs et aux prescripteurs d'avoir une idée sur la façon concrète de répondre aux exigences de performance des infrastructures [Cement Concrete Aggregates Australia, 2010]. Au Canada, le béton armé est le matériau utilisé depuis plus de cent ans pour la construction des réseaux d'infrastructures de ports, des routes, des barrages, des fondations, des piliers ou des tabliers de pont (figure 2.1) ainsi que d'autres éléments importants.

En ce qui concerne la conception du béton pour des infrastructures, nous devons avoir un mélange assez déformable à l'état frais, afin d'assurer une bonne capacité de remplissage dans les coffrages tout en préservant une bonne stabilité du béton pour réduire les risques de ségrégation, de ressuage et de tassement de surface. À jeune âge, nous devons assurer une résistance suffisante à la traction, ceci permettant de minimiser l'apparition de fissures causées par le retrait plastique et le dégagement de chaleur du béton. Des bonnes conditions de mûrissement et de température entre 21°C et 23°C sont alors recommandées [Khayat, 2011]. À l'état durci, des propriétés mécaniques sont demandées pour répondre aux sollicitations de services des structures. Néanmoins, c'est la durabilité en termes de perméabilité la plus faible, l'une des principales caractéristiques en face des conditions d'exposition sévères du climat ou des attaques physiques et chimiques, pour conférer des performances très élevées aux infrastructures. Le Pont de la Confédération est un exemple de la bonne utilisation du béton en termes de performance. Ceci a été construit en 1997 pour relier l'Île du Prince Édouard au reste du Canada, possédant une durée de vie prédite de 100 ans [Association canadienne du

ciment, 2011]. Bien entendu, un entretien approprié de cette infrastructure suite à sa construction est vital pour que cette durée de vie prédite soit atteinte.

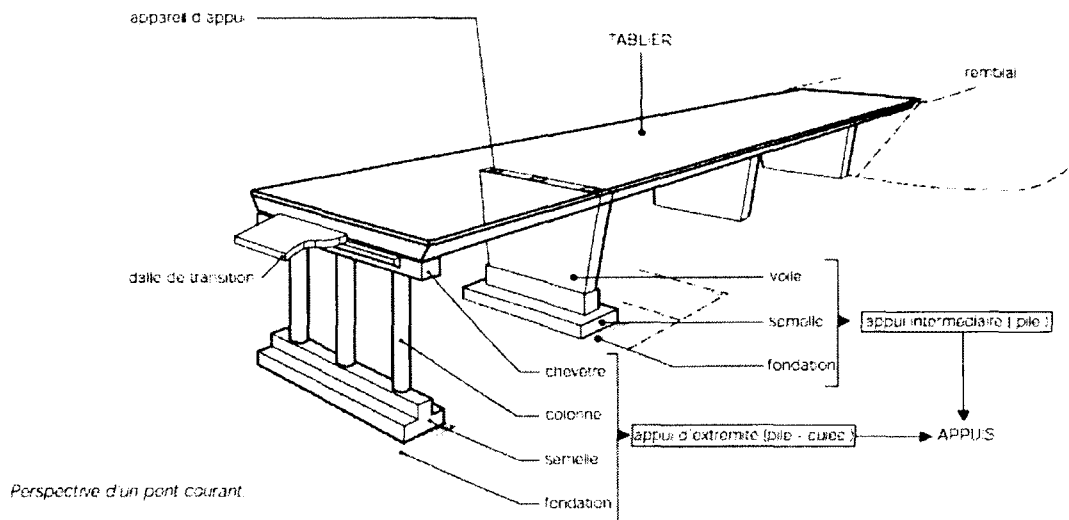


Figure 2.1 Description des éléments structuraux d'une infrastructure de pont en béton

2.2 Devis techniques

Des normes et des codes canadiens prescrivent des devis techniques des trois composants essentiels d'un projet de construction soit, les matériaux, la conception et la mise en œuvre des infrastructures en béton. Ceux-ci, étant. Ces codes et normes ont comme objectif la sécurité du public et sont continuellement mis à jour, afin de s'assurer que les matériaux utilisés et les pratiques de construction répondent aux besoins des infrastructures à mesure qu'ils évoluent. Du point de vue de la formulation du béton, les paramètres rapport eau/liant, la taille des granulats, la teneur en ciment et en air entraîné, la fluidité en termes d'affaissement ou d'étalement et la perméabilité, sont usuellement demandés pour obtenir des bonnes propriétés mécaniques, minimiser l'apparition des défauts dans la surface du béton, et le conférer une perméabilité la plus faible afin d'empêcher la pénétration des agents agressifs. Ceci est critique pour les structures construites dans les régions du nord de Québec affectées par le gel et dans les endroits en contact avec de l'eau de milieu marin, en prenant en compte que ces structures doivent résister des cycles de gel/dégel, de l'action de sels de déglacage, de la pénétration des ions chlores, de l'abrasion et de la cavitation [CAN/CSA-S6, 2006; CSA-A.23, 2001; MTQ-2101, 2007].

En ce qui concerne la construction des ouvrages d'art, le ministère des transports du Québec (MTQ) établi dans la norme MTQ-2101-07 des devis techniques pour la conception d'un béton de masse volumique normale (tableau 2.1). Un rapport E/L entre 0,34 et 0,50 et une résistance minimale en compression de 35 MPa, ainsi qu'un niveau de perméabilité entre 1000 à 1500 coulombs sont requis pour ces structures. Par rapport à la fluidité, un niveau d'affaissement entre 80 et 200 mm est demandé pour un BCV, tandis qu'un étalement entre 625 et 675 mm pour un BAP. En plus, une teneur en air entre 5 et 8% pour la majorité de ces structures est requise. Des ciments hydrauliques contenant de la fumée de silice, de la cendre volante ou du laitier peuvent être utilisés selon la norme CSA A362.

TABLEAU 2.1 DEVIS TECHNIQUES DES BÉTONS DE MASSE NORMALE POUR LES OUVRAGES D'ART [MTQ, 2007].

Caractéristiques des bétons de masse volumique normale pour les ouvrages d'art - Transport Québec										
Résistance à 28 jours (MPa)	Masse min. Liant (kg/m ³)	Type de liant ⁽¹⁾	Rapport eau/liant max. Ou dans l'intervalle	Gros granulats	Teneur en air ⁽²⁾ (%)	Affaissement		Étalement (mm) ±50	T max (µm)	Perméabilité aux ions chlore max. (coulombs)
						±30	±40			
35	340	Gub-SF	0.45	5 - 20	5 - 8	80 ⁽³⁾	-	-	230	1500
	365	Gub-F/SF, Gub-S/SF								
35	340	Gub-SF	0.35	5 - 20	5 - 8	-	-	-	230	1000
35	390	Gub-F/SF, HEB-F/SF ⁽⁵⁾ , Heb-N ⁽⁵⁾	0.45	5 - 20 5 - 14	5 - 8	150	-	-	230	1000
	410	Gub-F/SF, Gub-S/SF								
35	340	Gub-SF	0,38 à 0,42	5 - 20	5 - 8	120	-	-	230	1000
	365	Gub-F/SF, Gub-S/SF								
50	410	Gub-SF	0.37	5 - 14	5 - 8	-	180	-	230	1000
60	410	Gub-SF	0.35	5 - 14	5 - 8	-	180	-	230	1000
30	340	GU	0.50	5 - 20	4 - 7	150	-	-	-	-
	330	Gub-F/SF, Gub-S/SF								
50	410	Gub-SF, Gub-F/SF, Gub-S/SF	0,34 à 0,38	5 - 14	5 - 8	170	-	-	230 ⁽¹¹⁾	1000
35 ⁽⁶⁾	400	Gub-SF	0.45	5 - 14	6 - 9	-	-	625	230	1000
	420	Gub-F/SF, Gub-S/SF								
35 ⁽⁶⁾	460	Gub-F/SF, Gub-S/SF	0,35 à 0,40 ⁽⁷⁾	2,5 - 10 ⁽⁸⁾	6 - 9	-	-	675	230	1000
35	-	Gub-SF, Gub-F/SF, Gub-S/SF	-	2,5 - 10	5 - 9	-	-	650	300	1500
35	450	Gub-SF	0.42	2,5 - 10 ⁽⁹⁾	6 - 9	-	200	-	230	1500
35	390	Gub-SF, Gub-F/SF, Gub-S/SF	0.40	2,5 - 10	4 - 8	120	-	-	230	1000
35	390	GU	0.40	2,5 - 10 5 - 14	3 - 7 ⁽¹⁰⁾	150	-	-	300	1000

En ce qui concerne la construction des infrastructures de ponts routiers, la norme canadienne CAN/CSA-S6-06 établi des devis techniques pour la conception d'un béton de masse

volumique normale ayant un rapport maximal E/L entre 0,40 et 0,55. Ceci, en fonction des mécanismes de détérioration et des conditions d'exposition (tableau 2.2).

TABLEAU 2.2 RAPPORT MAXIMAL EAU/LIANT EN MASSE DES BÉTONS POUR DES PONTS ROUTIERS [CAN, 2006]

CODE CANADIEN SUR LE CALCUL DES PONTS ROUTIERS CAN/CSA-S6-06		
Mécanisme de détérioration	Conditions d'exposition	Rapport maximal * †‡
Corrosion provoquée par les chlorures	Milieu marin	0,45
	Sels aéroportés	0,45
	Éclaboussure de marée et embruns immergé	0,40
	Sources autres que le milieu marin	
	Humide, rarement sec	0,40
	Sec, rarement humide	0,40
	Cycle humide / sec	0,40
Attaque par le gel/dégel €	Non saturé	0,45
	Sature	0,40
Corrosion provoquée par la carbonatation sans chlorures	Humide, rarement sec	0,50
	Sec, rarement humide	0,50
	Cycle humide / sec	0,45
* À moins d'approbation contraire		
† Rapport de la masse d'eau sur celle des liants hydrauliques. Les liants hydrauliques comprennent le ciment portland, les fumées de silices, les cendres volantes et le laitier.		
‡ Le rapport doit être vérifié de façon indépendante par des mesures sur la formulation du mélange de béton et les constituants du béton. Des mesures de contrôle de la qualité et d'assurance de la qualité doivent être prises afin que le béton produit soit uniforme et que les limites du rapport eau/ciment soient maintenues au cours de la production. On doit notamment mesurer l'affaissement, la teneur en air, le poids unitaire et la résistance.		
€ La teneur en air doit être conforme à la CAN/CSA-A23.1. La teneur en air minimale doit être de 5,5% pour le béton dans les conditions de saturation, à moins d'approbation contraire.		

Les devis techniques d'un béton pour la mise en place des piliers d'une infrastructure de pont à Sherbrooke sont présentés dans le tableau 2.3. Ce projet fait partie des travaux développés dans la phase III.1 de cette étude. En plus, les devis techniques de la norme Canadienne CSA-A.23-01 et ceux des deux partenaires de la chaire de recherche industrielle CRNSG pour la conception d'un béton pour des infrastructures sont davantage présentés dans le tableau 2.4, ceci faisant partie des travaux développés dans la phase III.2A de cette étude à travers un plan d'expériences.

TABLEAU 2.3 DEVIS TECHNIQUES DU BÉTON POUR DES PILIERS DE PONT

Données	f _c minimale à 28 jours (MPa)	Masse min. de liant (kg/m ³)	Type de liant	E/L max.	Gros granulats (mm)	Teneur en air (%) après pompage	Étalement (mm) après pompage	L max (µm)	Perméabilité aux ions chlore à 28 jours (Coulombs)
Devis MTQ	35	400	GUb-SF	0,41	5-14	6-9	500 ± 50	230	1000
		400	GUb-F/SF, GUb-S/SF		5-20				

TABLEAU 2.4 DEVIS TECHNIQUES DU BÉTON POUR LA CONSTRUCTION DES INFRASTRUCTURES

Description	Norme Canadienne (CSA A.23 01 type C – XL)	Ministère des transports du Québec (M.T.Q 31.01- XIII)	Ville de Montréal (3VM-20)
E/L maximal	0,37	0,34 à 0,38	0,37
f _c (MPa)	50 à 56 jours	50 à 28 jours	50 à 56 jours
Type du ciment	GU	Gub-SF, Gub-F/SF, Gub-S/SF	
Perméabilité aux ions chlores (Coulomb)	1000 à 56 jours	1000 à 56 jours	800 à 56 jours

2.3 Étude des bétons existants

La construction des infrastructures en béton armé sont réalisés à date en utilisant une vaste gamme de béton pouvant être divisée en deux principaux types: le béton conventionnel vibré (BCV) possédant un affaissement entre 75 et 190 mm ou plus [ACI 309.R-05] et un seuil de cisaillement (τ_0) entre 500 et 2000 Pa [Khayat, 2011] et le béton autoplaçant (BAP) possédant un étalement entre 560 mm et 660 mm ou plus [ACI 237.R, 2007] et un τ_0 entre 50 et 100 Pa [H. Wang, 2006]. Le choix de l'un ou de l'autre type dépend de plusieurs considérations, notamment le critère économique, l'expérience par rapport à son utilisation, la densité de ferrailage, l'accès pendant le coulage ou l'aspect architectural des structures. Nous présenterons l'historique des BCV et BAP, les avantages et les inconvénients concernant leur utilisation, afin de bien saisir pourquoi et comment ils ont été développés pour émettre des recommandations sur l'utilisation d'un nouveau type BSAP pour les infrastructures.

2.3.1 Béton conventionnel vibré (BCV)

2.3.1.1 Historique

Au début du XX^e siècle, des bétons très secs ont été mis en place et consolidés avec des grosses tiges impliquant une demande importante de main d'œuvre principalement pour la construction des structures de barrages, des semelles et des murs de soutènement contenant des faibles teneurs en armatures. Postérieurement, une augmentation de la teneur en armatures a occasionné la réduction de l'épaisseur de couche, en empêchant la bonne consolidation de béton. Pour améliorer l'ouvrabilité et faciliter la consolidation, de l'eau a été ajoutée au béton pendant la mise en place au chantier. Ceci a affecté ses propriétés mécaniques et sa qualité finale [ACI 309.1R-08]. Vers 1930, des vibrateurs ont été développés pour la mise en place des structures ayant des armatures ferrillées et des épaisseurs de couches minces, afin d'améliorer la compacité, les propriétés mécaniques et l'imperméabilité du béton. Les fréquences des premiers vibrateurs ont été limitées à 3000 et 5000 vibrations par minute (50 - 80 Hz) à cause des problèmes de conception et de maintenance. Lorsqu'il est devenu évident que des fréquences plus élevées sont efficaces pour la consolidation du béton, des fabricants de vibrateurs ont apporté les améliorations nécessaires. [Walz, 1960] a montré que la réduction de la friction interne des constituants du béton est le résultat de l'accélération produite lors de la vibration. Dans les années 80, des méthodes pour couler le béton, et des systèmes de consolidation ont été améliorés pour faciliter la mise en place des structures en béton et augmenter la productivité au chantier.

2.3.1.2 Avantages par rapport au BAP

Dans le cas du BCV, il existe certains avantages techniques et économiques conférés par ce béton par rapport au BAP. On peut citer:

- Le faible coût des matières premières par rapport au BAP, ce qui fait que le BCV coûte moins cher à la sortie de l'usine;
- La disponibilité d'une formulation plus robuste à l'usine;
- Le système de fabrication et de dosage moins plus robuste que dans le cas d'un BAP;
- La pression latérale exercée sur le coffrage plus faible que dans le cas d'un BAP.

2.3.1.3 Caractérisation du BCV

Afin d'avoir une idée sur la maniabilité du BCV pour déterminer sa facilité de malaxage, de transport, de mise en place et de consolidation ainsi que de finition, nous utilisons habituellement l'essai d'affaissement avec le cône d'Abrams [ASTM C143/C143M-08]. Dans cet essai, le cône humidifié est placé verticalement sur une surface solide, plane et non absorbante. Le cône est rempli en trois couches égales. Pour chaque couche, on applique un pilonnage de 25 coups. 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 près du béton et l'affaissement mesuré est la différence entre la hauteur du cône et celle de l'échantillon affaissé, à partir du centre de la surface supérieure du béton (figure 2.2). Nous présentons au tableau 2.5 les caractéristiques de maniabilité pour les différents BCV utilisés au chantier.



Figure 2.2 Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams

TABLEAU 2.5 CARACTÉRISTIQUES DE MANIABILITÉ DES BCV UTILISÉS AU CHANTIER [ACI 309.R-05]

Description de la consistance	Affaissement (mm)	Temps Vebe (s)	Facteur de compactage	Table vibrante
extrêmement sec	-	32 à 18	-	112 à 56
Très sec	-	18 à 10	0,7	56 à 28
Sec	0 à 25	10 à 5	0,75	28 à 14
Sec plastique	25 à 75	5 à 3	0,85	14 à 7
Plastique	75 à 125	3 à 0	0,9	< 7
Très plastique	125 à 190	-	-	-
Fluide	190 et plus	-	0,95	-

2.3.1.4 Principe de la consolidation

Le but de la consolidation est d'améliorer l'homogénéité et la qualité finale du béton, en réduisant la présence des vides de compactage et des nids d'abeilles en évacuant l'air emprisonné en excès dans le béton frais. Cette consolidation ne doit pas faire sortir de quantités importantes d'air entraînée intentionnellement dans le béton [Kosmatka et coll., 2000]. Après sa mise en place dans le coffrage et sans recevoir de la consolidation mécanique, le béton contient une quantité excessive et préjudiciable d'air piégé pouvant varier entre 5% et 20% [Neville, 2000]. Cette quantité est principalement fonction de la maniabilité du béton, de la méthode de mise en place, de la taille des granulats et de la teneur en armatures. Si nous laissons durcir le béton dans cette condition, il sera très poreux (Figure 2.3) et mal lié aux armatures. Il aura alors une faible résistance à la compression et à la détérioration, un degré de perméabilité élevée, une surface défectueuse et une mauvaise durabilité. Le béton doit alors être consolidé suffisamment soit par vibration ou manuellement (avec une barre métallique) afin d'obtenir une structure plus compacte et durable [ACI 309.R-05].

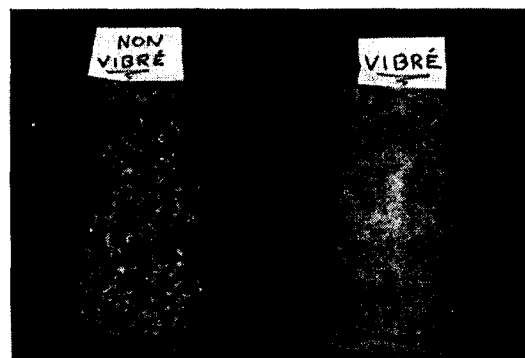


Figure 2.3 Comparaison des qualités de béton

2.3.1.5 Consolidation par vibration mécanique

Lorsque le BCV est consolidé par vibration, on supprime temporairement les frottements internes existants entre les granulats. Le béton alors se comporte comme un corps plastique caractérisé par une certaine viscosité et un faible seuil de cisaillement facilitant son écoulement à l'intérieur du coffrage. Le frottement interne est rétabli dès que cesse la vibration du béton [ACI 309.1R-08]. La consolidation par vibration interne ou externe est la méthode la plus couramment utilisée. La consolidation par vibration interne est réalisée à

l'aide d'une aiguille vibrante plongée verticalement dans la masse du béton (figure 2.4). Après le coulage du béton dans le coffrage, l'aiguille vibrante est insérée verticalement à une distance uniforme sur l'aire de béton mis en place. La distance entre les insertions de l'aiguille doit être environ 1,5 fois le rayon d'influence, en prenant en compte que la zone visiblement affectée par la vibration chevauche la zone adjacente juste vibrée. On retire cette aiguille lentement dès que le béton a atteint un degré de consolidation suffisant.

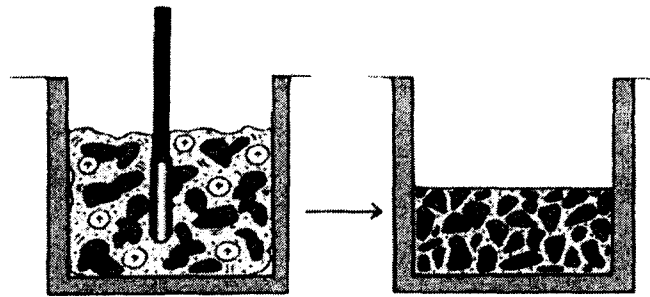


Figure 2.4 Consolidation du béton par vibration interne

Le modèle d'aiguille vibrante le plus courant est relié par une gaine à un moteur électrique, tel que montré sur la figure 2.5. Cette aiguille contient une masse disposée de façon excentrique par rapport à son axe et lorsque le moteur électrique la fait tourner, il résulte un mouvement oscillatoire de vibration. Les impulsions sont dirigées dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'aiguille vibrante [ACI 309.R-05]. Pour vérifier le bon fonctionnement de l'aiguille vibrante, nous pouvons utiliser un tachymètre à tige afin de mesurer sa fréquence mais également pour vérifier l'uniformité de son amplitude en différents points à la surface des coffrages

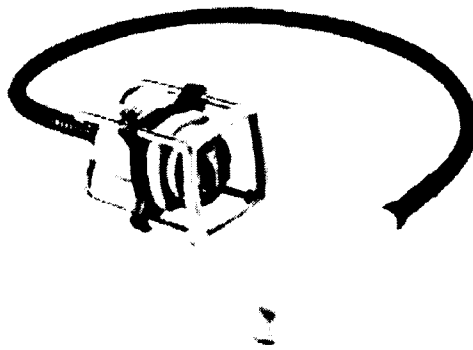


Figure 2.5 Aiguille vibrante à moteur électrique [ACI 309.R-05]

Le diamètre de l'aiguille vibrante varie entre 20 et 180 mm et sa fréquence est associée à une amplitude, un moment excentrique et un rayon d'influence. Plus le diamètre augmente, moins la fréquence est élevée, mais aussi plus le rayon d'action augmente. Les aiguilles de faible diamètre ont des fréquences élevées comprises entre 150 et 250 Hz et de faibles amplitudes comprises entre 0,4 et 0,8 mm. Une aiguille vibrante d'un diamètre de 20 à 40 mm a un rayon d'action fluctuant entre 75 et 150 mm, tandis qu'une aiguille de 50 à 75 mm aura un rayon d'influence de 175 à 350 mm. Le choix de la fréquence de vibration est fonction de l'ouvrabilité disponible du béton [ACI 309.R-05].

La consolidation par vibration externe est faite à l'aide des vibrateurs de coffrage, des tables ou des règles vibrantes, des taloches et d'autres outils de finition vibrants. Les vibrateurs de coffrage sont les plus utilisés pour vibrer des éléments préfabriqués ou des éléments ayant des couches très minces ou fortement ferrillées ainsi que pour des mélanges ayant un affaissement presque nul, ceci empêchant l'utilisation des vibrateurs internes (Figure 2.6). La source d'énergie des vibrateurs peut être pneumatique, électrique ou hydraulique et ces vibrateurs sont fixés sur les coffrages par l'intermédiaire d'une plaque pour ne pas endommager les coffrages et pour répartir la vibration adéquatement. La fréquence et la durée du temps de vibration sont fonction du type d'appareil mentionné [ACI 309.R-05].

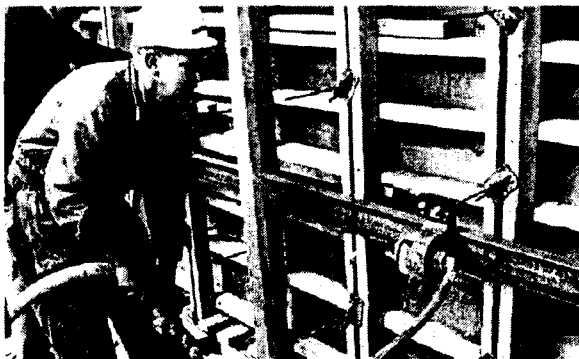


Figure 2.6 Montage de vibreur externe dans un coffrage de bois [ACI 309.R-05]

2.3.1.6 Limitations de la consolidation par vibration

La vibration inadéquate du béton peut occasionner l'apparition de vides, des défauts de surface ou conférer des conditions non homogènes à une structure. Des variables associées à la vibration, tels que le type et le fonctionnement adéquat des vibrateurs, le temps d'application

de la vibration, la distance d'immersion entre les aiguilles vibrantes, l'épaisseur ou la hauteur de couche du béton, ceux-ci peuvent occasionner la réduction significative de la teneur en air entraîné et de la résistance à la compression ainsi que l'augmentation de la perméabilité du béton, ce qui se traduit en la réduction de la durée de vie des structures en face de conditions d'exposition sévères. Une augmentation de la vibration excessive du béton dans plusieurs projets de routes à l'état d'Iowa a provoqué l'apparition des lignes longitudinales de vibrateurs (dans le cas de la construction de pavages avec des machines à coffrage coulissant), la réduction significative de la teneur en air entraînée et la présence de défauts dans la surface finie de pavages [Tymkowicz, 1996]. Cette vibration excessive a également été considérée comme un facteur causant pour la détérioration prématurée d'au moins deux projets de routes à Iowa.

[Forsblad, 1995] a établi une relation entre l'effort de vibration, la teneur en vides, la densité, et la résistance à la compression dans une étude sur la consolidation adéquate par vibration des structures de pont en béton ayant un affaissement entre 75 et 240 mm, une résistance en compression entre 40 et 45 MPa et une teneur en air de 2,5% dans le cas d'un béton conventionnel et de 5 à 6% dans le cas d'un béton à air entraîné. Des aiguilles vibrantes ayant un tube de diamètre entre 55 et 60 mm et des efforts de vibration entre 75 et 1200 s/m³ ont été considérées. Il a été trouvé qu'un effort de vibration insuffisante (< 250 s/m³) a occasionné l'augmentation de vides et de pores en réduisant la densité et la résistance à la compression du béton, tandis qu'un effort de vibration entre 250 et 600 s/m³ n'as pas eu une grande influence sur ces propriétés (Figure 2.7).

Dans le cas d'un béton contenant entre 5 et 6% d'air entraîné, un effort élevé de vibration de 1200 s/m³ a occasionné l'augmentation de 3% de la densité maximale et de 12% de la résistance à la compression du béton (figure 2.8). Ceci a été associé à la réduction indésirable de la teneur en air entraîné conférée initialement au béton. Concernant le risque de ségrégation, des lignes d'écoulement foncées ont été identifiées dans la surface verticale du béton. L'apparition de ces lignes a probablement été occasionnée par l'existence de couches de pâte de ciment ségréguées à la frontière des lignes entre couches pendant la coulée du béton.

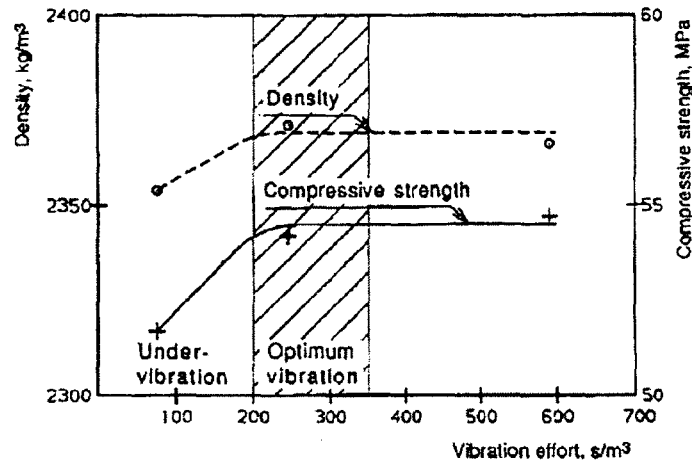


Figure 2.7: Rapport entre l'effort de vibration, la densité et la résistance à la compression d'un béton conventionnel contenant 2.5% d'air attrapé [Tymkowicz, 1996].

L'apparition des lignes d'écoulement est réduite lorsque l'effort de vibration passe de 600 s/m³ à 300 s/m³. [Forssblad, 1995] a finalement montré les risques d'apparition des défauts et de diminution de la qualité d'un BCV à cause de la vibration inadéquate, étant plus critiques lorsqu'il existe un faible effort de vibration et moins critique dans le cas d'un effort de vibration élevé pour un affaissement entre 75 et 240 mm.

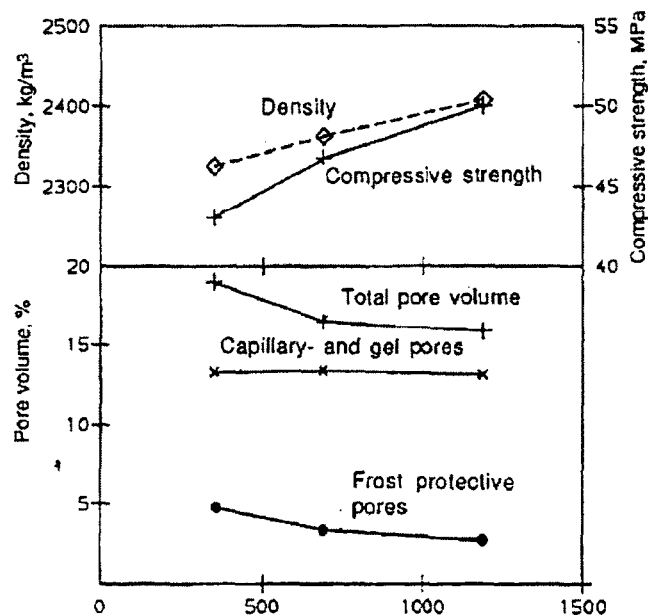


Figure 2.8 : Rapport entre l'effort de vibration, la densité, le volume de pores et la résistance à la compression d'un béton contenant entre 5 à 6% d'air entrainé [Tymkowicz, 1996].

2.3.1.7 Recommandations

- Avant que le béton soit consolidé, il doit être mis en place en couches successives considérant une profondeur à peu près égale à la longueur de la tête de l'aiguille vibrante. Ceci ne devrait généralement pas dépasser 0,5 m, surtout dans les cas de structures verticales [ACI 309R-05].
- Dans le cas d'un BCV soumis à la vibration interne, chaque insertion de l'aiguille doit être espacée 1,5 fois son rayon d'action, pour assurer que toutes les zones soient vibrées.
- Il faut faire pénétrer la totalité de l'aiguille vibrante de façon horizontale dans l'épaisseur du béton, ne touchant pas le fond de l'assise dans le cas des dalles sur sol, ni déplaçant le vibreur horizontalement pour éviter la ségrégation du béton [Leclerc, 2010].
- Le temps d'insertion de l'aiguille vibrante est jugé par l'opérateur. Ceci fluctue entre 5 à 20 secondes [Forssblad, 1995]. À la surface du béton, l'apparition d'un film mince de pâte brillante autour de l'aiguille vibrante et l'interruption de la remontée de grosses bulles d'air s'échappant de la surface peuvent être considérés pour arrêter la vibration. Le retrait du vibreur à une vitesse de 80 mm/seconde est recommandé [Anon., 1956].

2.3.2 Béton autoplaçant (BAP)

Le BAP est un type de béton à haute performance qui se met en place facilement et se serre sous le seul effet de la gravité, sans apport de l'énergie de consolidation interne ou externe. À l'état frais, le BAP est très fluide et possède un faible τ_0 pour assurer une haute déformabilité dans les coffrages ayant des formes complexes ou des concentrations élevées en armatures et une viscosité plastique moyenne (η) pour maintenir l'homogénéité et réduire les risques de ségrégation, de ressuage et de tassement de surface [Khayat, 1999; Okamura, 1995]. A l'état durci, les essais sur béton visent à vérifier l'homogénéité des propriétés du matériau en place. Il s'agit des essais mécaniques sur carottes, de comptage des granulats sur des éprouvettes sciées en deux pour estimer la ségrégation et d'essais d'arrachement d'armatures à différentes hauteurs d'une structure donnée [Serran, 1999]. Le BAP est capable de conférer des bonnes performances mécaniques et des perméabilités très faibles, ce qui se traduit dans une durée de vie prolongée des structures.

2.3.2.1 Historique du BAP

Le BAP a été une des plus grandes innovations que l'industrie de la construction ait connue comme résultat de recherches scientifiques développées au Japon. L'idée de concevoir un béton très fluide qui ne nécessite pas de consolidation mécanique lors de sa mise en place a été lancée au début par des chercheurs de l'université de Tokyo. C'est Okamura en 1986, le premier chercheur qui s'est occupé de proposer un béton qui soit capable de se mettre en place par lui-même sous son propre poids. Trois ans plus tard, le premier prototype de BAP a été réussi par Ozawa et Maekawa à l'université de Tokyo [Ozawa et coll, 1989]. Ce type de béton a initialement été utilisé au Japon pour améliorer la qualité de la peau et la durabilité des structures provoquée par un appauvrissement de la qualité des constructions en béton à cause du manque d'ouvriers qualifiés. À partir de l'année 1990, le BAP a été utilisé pour la confection industrielle des éléments préfabriqués possédant des teneurs élevées d'armatures et pour améliorer la productivité globale des ouvrages [Tanaka, 1993; Khayat, 2000]. Au Japon, le volume de BAP utilisé dans l'année 1992 a été de 200 000 m³ et au cours de deux dernières décennies, cette consommation a augmenté presque deux fois jusqu'à l'année 2006 (figure 2.9) étant l'une des applications importantes celle du projet de construction du pont Akashi Kaykio de 1990 m de longueur, avec un volume total de 290 000 m³ de BAP. Récemment, un volume entre 0,1 à 0,2% de BAP concernant le volume total du béton préparé à l'usine a été utilisé pour la mise en place au chantier, tandis que 3% de BAP a été utilisé pour la confection industrielle des éléments préfabriqués [Nagataki, 2010].

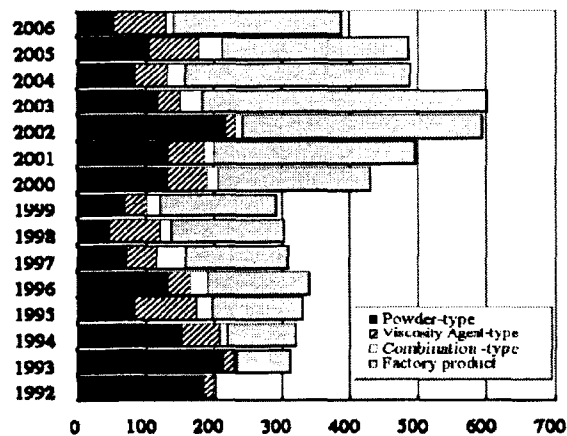


Figure 2.9 Volume d'application de BAP au Japon (milliers de m³) [Nagataki, 2010]

En Europe, il existe une tendance différente d'utilisation de BAP dépendamment de chaque pays. À titre d'exemple, nous présentons au tableau 2.6 les volumes en pourcentage consommés dans trois pays. Ces volumes sont très élevés par rapport au Japon et cela peut être à cause du prix initial et des performances différentes demandées.

TABLEAU 2.6 CONSOMMATION DU BAP EN EUROPE [Nagataki, 2010]

Pays	Participation	
	Mis en place dans le site	Produit à l'usine
Danemark	28% (2006) 24% (2006)	50% (2005)
Suède	5% (2003)	50% (2003)
Netherland	Pas d'information	70% (2005)

En Amérique du nord, depuis l'année 2000 le BAP a reçu une grande acceptation dans l'industrie des éléments préfabriqués. Aux États-Unis, des volumes de BAP de 135 000 m³ dans l'année 2000 et de 1,8 millions m³ dans l'année 2003 ont été utilisés pour la mise en œuvre des garages de stationnement, des panneaux architecturaux et pour la confection des éléments préfabriqués [ACI 237.R-007]. Au Canada, le BAP a été utilisé pour des applications de réparation des structures de pont, des sections de tunnel, des garages d'stationnement et des murs de soutènement ayant des sections d'armatures très ferrillées [ACI 237.R-07, Khayat & Morin, 2002]. En général, le BAP a été utilisé avec des succès pour des travaux de mise en place et de réparation, où la consolidation par vibration est difficile. Néanmoins, l'utilisation du BAP n'est pas encore généralisée dans l'industrie de la construction, tel qu'expliqué dans la section 2.3.2.5.

2.3.2.2 Avantages des BAP par rapport au BCV

En prenant en compte la capacité de déformabilité très élevée du BAP à l'état frais, il y a des avantages par rapport au béton conventionnel vibré [ACI 237.R, 2007]. On peut citer :

- L'élimination de la vibration mécanique et des risques de mauvaise qualité de finition lorsque le béton n'a pas été vibré adéquatement.
- Le coulage du BAP à n'importe quelle heure de la journée, sans créer de nuisance sonore dans le voisinage à cause de l'élimination de la vibration [Aïtcin, 2003].

- La réduction du coût de la main d'œuvre, à cause de la réduction du personnel ouvrier chargé de la mise en place du béton et de la réduction des risques d'accident sur chantier en supprimant des postes de travail à risque [Ouchi et coll, 2003];
- L'amélioration de la productivité globale de l'ouvrage à cause de la réduction de la main d'œuvre et des travaux de finition de surface, de la suppression des systèmes de vibration, de l'augmentation du taux de coulée en béton et de la durée de vie des coffrages;
- L'amélioration des performances mécaniques, esthétiques et de durabilité, pratiquement indépendant du savoir-faire du personnel ouvrier lors de la mise en place;
- La réduction de l'impact environnemental à cause de l'utilisation des ajouts cimentaires et de l'élimination du bruit occasionné par des équipements vibreurs;
- La réduction jusqu'à 10% du coût global de construction grâce à l'utilisation du BAP [Szecsy et coll., 2003].

2.3.2.3 Formulation du BAP

La formulation d'un BAP se distingue d'un BCV par une teneur en pâte et en granulats fins plus importants ainsi qu'un volume en gros granulats plus faible [Turcry, 2004] (Figure 2.10). Ceci est nécessaire pour conférer au BAP une déformabilité et une capacité de remplissage maximales tout en assurant une bonne stabilité après le coulage du béton dans le coffrage.

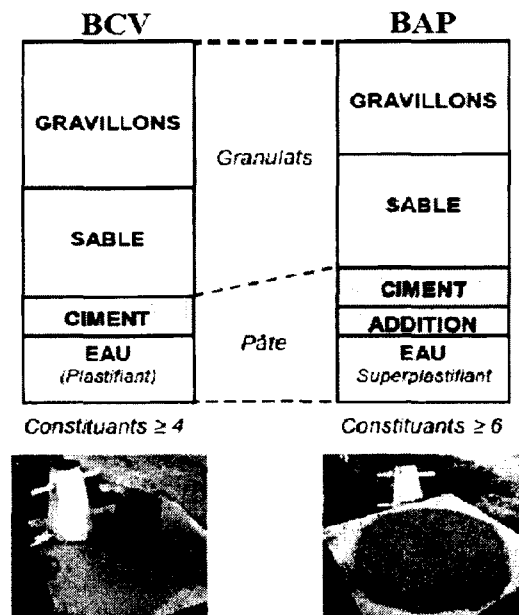


Figure 2.10 Composition d'un BCV et d'un BAP [Turcry, 2004]

Les méthodes existantes de formulation considèrent toujours comme objectifs de conférer au BAP une maniabilité acceptable après malaxage, une apparence uniforme à l'état durci, des bonnes propriétés mécaniques et de durabilité et finalement un rapport optimal qualité/coût. [Kosmatka et coll., 1991] et [Kashima et coll., 1995] décrivent trois approches pratiques pour la bonne formulation d'un BAP :

- Augmentation de la teneur en pâte et l'utilisation d'un SP, afin de réduire le rapport E/L, en préservant la viscosité;
- Utilisation d'un agent colloïdal (AC), l'augmentation de la teneur en pâte et l'utilisation d'un SP pour augmenter la fluidité et réduire le risque de ségrégation;
- Faible augmentation de la teneur en liant ou de fibre et l'utilisation d'un SP et d'un AC, afin d'obtenir une fluidité et une viscosité adéquate.

[Khayat, 1999] a proposé des critères de base pour la conception d'un BAP, afin d'assurer un bon équilibre entre la déformabilité et la stabilité pour réduire le risque de ségrégation, de ressuage et de blocage (Figure 2.11).

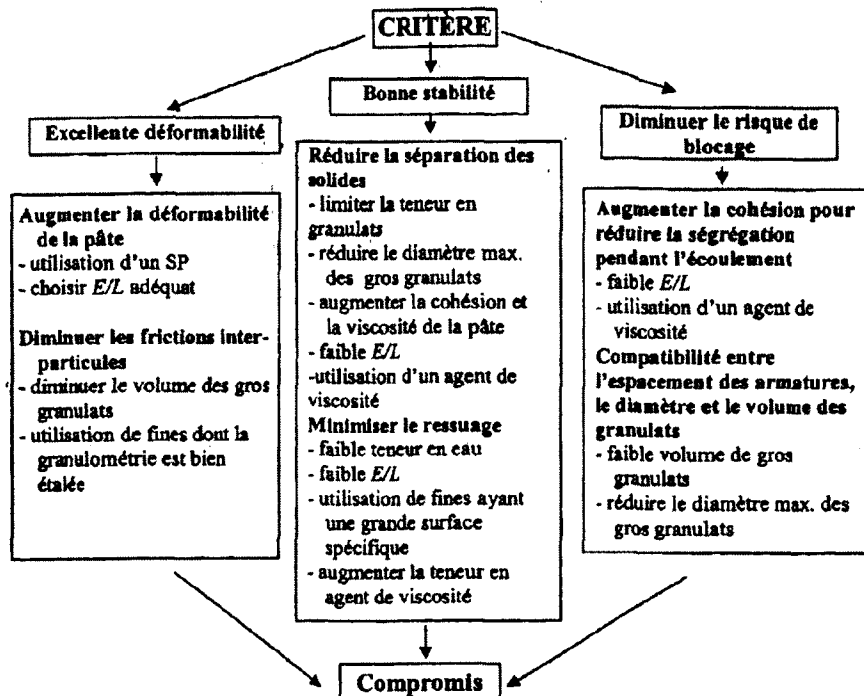


Figure 2.11 Critères établis pour obtenir une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage [Khayat, 1999].

Le but de maximiser la déformabilité d'un BAP est de remplir adéquatement les coffrages contenant des couches minces ou des teneurs en armatures très ferraillées et de contourner les obstacles rencontrés durant l'écoulement. Dans le cas de la stabilité, lorsque le béton est coulé dans le coffrage et en absence des contraintes extérieures vis-à-vis de l'écoulement, il existe des risques de ségrégation, de ressuage et de blocage à cause de la grande déformabilité du BAP [Khayat, 1999]. Ce risque peut augmenter en fonction de la teneur en liant, du rapport E/L ou S/G, de la maniabilité ou de la méthode de coulage.

La ségrégation est le ressuage sont les deux manifestations de la dégradation de l'homogénéité d'un béton frais. La ségrégation est associée à la variation en la concentration des constituants du béton frais, entraînant une différence de proportions dans la masse. La ségrégation peut intervenir lors des phases de transport, de mise en place, de vibration et de finition. Les différences de taille et de densité des particules dans le béton peuvent amorcer la migration des plus grosses particules vers le bas par action de la pesanteur. La ségrégation augmente avec la maniabilité, la diminution de la teneur en ciment, la taille et la teneur en granulats ainsi que la technique de coulage [Laurent, 2002]. Pour la minimiser, nous pouvons optimiser le squelette granulaire du béton et utiliser des AC composés de longues molécules organiques afin d'augmenter la viscosité de l'eau de gâchage.

En ce qui concerne le ressuage, il est présent lorsque les grains ont un mouvement d'ensemble vers le bas. Ce mouvement force l'eau du béton à percoler vers le haut. Ainsi, une fois le béton mis en place dans le coffrage, une pellicule d'eau claire apparaît progressivement dans la surface, ce que nous connaissons comme ressuage externe. Cette pellicule d'eau ne sera visible que si le débit d'évaporation à la surface du béton est inférieur au débit d'eau ressuée [Laurent, 2002]. Dans le cas de l'existence de barres d'armature, cette eau va percoler aussi vers le haut mais se concentrer au-dessous des barres, ce que nous connaissons comme ressuage interne, pour augmenter la porosité de l'interface pâte-granulats. Si nous ajoutons une quantité de poudre fine nous pouvons réduire le ressuage et la ségrégation dans le béton.

Concernant la formulation d'un BAP possédant un faible risque de ségrégation, de ressuage et de blocage, [Khayat, 1999] considère la réduction du volume de gros granulats et la conception d'une excellente déformabilité et une viscosité adéquate du béton. [Okamura et coll., 1993] considèrent l'utilisation d'un volume de gros granulats inférieur à 50% du volume

de solides pour avoir une probabilité négligeable du blocage. [Khayat et coll., 1994] ont déterminé les quantités optimales en gros granulats (granulats concassés lavés) et en sable capables d'améliorer la fluidité d'un BAP en présence d'un AC et d'un SP. Ces quantités optimales correspondent à une teneur de 300 l/m^3 de gros granulats composés de 70% de granulats ayant un diamètre maximum de 4 mm et 30% de granulats ayant un diamètre maximum de 20 mm et un rapport volumique de sable/pâte de 0,6. Une déformabilité maximale peut être obtenue à travers l'utilisation des ajouts cimentaires, tel que de la cendre volante possédant des particules sphériques et lisses. Une viscosité adéquate peut être visée par l'utilisation d'un AC, l'inclusion des ajouts cimentaires ou la réduction du rapport E/L en limitant la teneur en eau libre. [Ozawa et coll., 1990] ont démontré que l'utilisation d'un agent colloïdal en faible dosage diminue la résistance τ_0 de la pâte en améliorant la déformabilité combinée à une bonne résistance à la ségrégation. [GjØrv, 1991] a démontré pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m^3 , que l'ajout jusqu'à 6% de fumée de silice n'augmente pas le τ_0 , mais aussi il permet avoir une amélioration de la viscosité du béton.

2.3.2.4 Caractérisation du BAP

Tel que mentionné dans la section 2.3.1.3, nous utilisons habituellement le cône d'Abrams pour avoir une idée de la fluidité du béton. Dans le cas d'un BCV, c'est l'affaissement qui est mesuré verticalement (ASTM C143/C143M-08) tandis que dans le cas d'un BAP, c'est l'étalement qui est mesuré horizontalement (ASTM C1611/C1611M-05) [HWANG, 2006]. Les différents types de consistance sont présentés en termes d'affaissement et d'étalement sur la figure 2.12 pour un béton conventionnel vibré (BCV), un béton semi-autoplaçant (BSAP), un béton autoplaçant (BAP) et un béton autonivelant (BAN). [Zhuguo L, 2007] considère que la mesure de l'étalement n'est pas suffisante pour caractériser la consistance des nouveaux types de béton afin de l'adapter au mieux à certaines structures et conditions de construction. À cet effet, plusieurs types d'essais normalisés et non normalisés ont été proposés pour le BAP afin d'évaluer ses propriétés à l'état frais. Certains essais évaluent la déformabilité et l'ouvrabilité, tandis que d'autres s'intéressent plus aux mesures de la stabilité du béton.

Pour évaluer la déformabilité d'un BAP, nous pouvons mesurer l'étalement et la vitesse d'écoulement de ce béton, tel que présenté tout de suite :

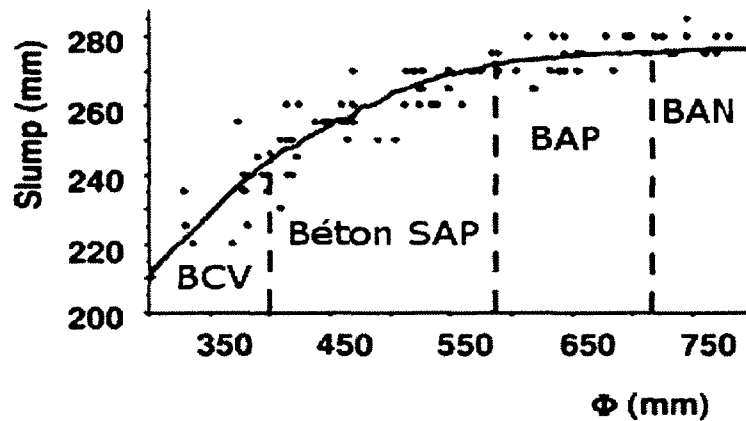


Figure 2.12 Relation entre l'affaissement et l'étalement des bétons fluides [Khayat, 1999]

- **Essai d'étalement** : Cet essai donne une indication sur la mobilité du béton dans un milieu non confiné. L'étalement est le résultat de la mesure du diamètre de la galette suite au soulèvement du cône d'Abrams et à l'arrêt de l'écoulement du béton. L'étalement est relié au seuil de cisaillement, contrainte minimale requise pour amorcer l'écoulement du béton. Il permet également de faire une estimation visuelle du risque de ségrégation par effet de la gravité à travers l'accumulation des gros granulats au centre de la galette et par la présence d'une auréole de laitance au périmètre du béton étalé. Dans le cas d'un BAP, nous avons une valeur typique d'étalement de 550 mm et plus [ACI 237.R-007].
- **Vitesse d'écoulement**: Nous mesurons le temps d'écoulement pour obtenir une galette de 500 mm. Ceci nous donne un indice de viscosité, l'une des propriétés rhéologiques importantes du béton. Une valeur typique entre 2 à 7 secondes est usuellement demandée pour le BAP.

Afin d'évaluer l'habilité de passage d'un BAP, nous pouvons considérer les essais de V-Funnel, L-Box, U-Box et J-Ring, tel que décrit à continuation :

- **V-Funnel** : Cet essai permet d'évaluer la mobilité d'un BAP en milieu non confiné. Il donne une idée de la viscosité du béton, en mesurant le temps d'écoulement de 12 l du béton à travers un entonnoir de section carrée [Ozawa et coll, 1995]. Plus le temps d'écoulement est élevé plus le béton est visqueux et moins fluide.
- **L-Box** : Cet essai permet de décrire la mobilité en milieu confiné et la résistance à la ségrégation dynamique d'un BAP. La partie verticale en L est remplie du béton en une

seule fois. Après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers 2 ou 3 armatures de $\Phi = 14$ mm distantes de 39 mm. Après écoulement, nous mesurons la hauteur dans la partie verticale H1 et celle dans la partie horizontale H2 pour calculer le taux de remplissage $h2/h1$ qui renseigne sur la capacité du BAP à s'écouler dans un milieu confiné.

Pour évaluer la stabilité statique, de la colonne de ségrégation, du tassement de surface, de l'indice visuel de stabilité, ainsi que l'essai de pénétration et de stabilité au tamis peuvent être utilisés. D'autres essais peuvent être considérés tels que celle de la boîte en U, J-Ring et U-Box permettant d'évaluer la capacité de remplissage d'un BAP.

Les grandeurs spécifiques des essais décrits ci-dessous sont reliées au seuil de cisaillement et à la viscosité plastique, deux paramètres importants pour caractériser le comportement rhéologique du béton. [ROUSSEL, 2007] a mentionné que le seuil de cisaillement ne peut être correctement mesuré par l'essai d'étalement. [ROUSSEL et coll., 2006] ont davantage montré comment l'essai L-BOX, utilisé pour caractériser l'écoulement dans une zone fortement armée peut être utilisé pour estimer les propriétés rhéologiques d'un BAP. [Hwang et coll., 2006] ont établi des paramètres de référence pour des différents essais permettant de caractériser la déformabilité, la capacité de remplissage ainsi que la stabilité d'un BAP (tableau 2.7).

2.3.2.5 Limitations

Malgré les progrès techniques du BAP, ce béton possède certaines limites d'ordre technique et économique, qui peuvent être résumées en :

- Le BAP est normalement conçu avec une teneur en matériaux cimentaires et en adjuvants chimiques relativement élevées, ce qui résulte en un coût initial moins économique par rapport à un BCV. Ceci ne permettant pas encore de généraliser son utilisation dans l'industrie pour la construction d'une variété des infrastructures. [Ghezal et coll., 2002]
- Dans certains cas, le manque de compatibilité entre les matériaux cimentaires et les SP ne permettent pas de trouver un bon équilibre entre la déformabilité/stabilité pour optimiser des BAP plus performants et économiques [BONEN et SHAH, 2005].
- La formulation d'un BAP est moins robuste à l'usine que celle d'un BCV [Aïtcin, 2003].

TABLEAU 2.7 CARACTÉRISTIQUES DE MANIABILITÉ, MÉTHODES D'ESSAI ET VALEURS RECOMMANDÉES [HWANG ET COLL., 2006]

Caractéristiques de maniabilité	Méthodes d'essai	Valeurs recommandées suggérées en 1 à 6
Déformabilité and rapport de fluidité	Étalement	1. Auteurs: 620 à 720 mm 2. EFNARC: 650 à 800 mm (MSA jusqu'à 20 mm) 3. JSCE: 600 à 700 mm 4. PCI: ≥ 660 mm 5. RILEM TC 174: N/A Association: 650 à 750 mm
	T 50	2. 2 à 5 secondes 4. 3 à 5 secondes 6. 3 à 7 secondes
Habilité de passage (Ouverture étroite, habilité de passage, écoulement confiné, écoulement restreint, stabilité dynamique)	V-Funnel *	1. < 8 secondes 2. 6 à 12 secondes 4. 6 à 10 secondes
	L-box, h2/h1	2. > 0.8 4. > 0.75 6. > 0.8
	U-box, B _h	2. h2/h1: 0 à 30 mm 3. Rang 1 † (35 à 60 mm l'espacement entre les barres) Rang 2 ‡ (60 à 200 mm l'espacement entre les barres) 4. Rang 1
	J-Ring	2. < 10 mm 4. < 15 mm
Capacité de remplissage (habilité de passage + déformabilité restreinte)	Boîte de remplissage	1. $\geq 80\%$ 2. 90 à 100%
	L-box, h2/h1	Même qu'habilité de passage
	U-box, B _h	Même qu'habilité de passage
	J-Ring	Même qu'habilité de passage
Stabilité statique (résistance à la ségrégation, ressuage et tassement de surface)	Tassement de surface	1. $\leq 0.5\%$
	Indice visuel de stabilité	4. 0 ou 1
	Pénétration	5 et 6. ≤ 8 mm
	GTM stabilité au tamis	2. $\leq 15\%$

* Ouverture de V-Funnel 65 x 75 mm. † Rang 1 fait référence au B_h de 305 mm à travers un diamètre de barre de 5 à 10 mm avec 35 mm d'espacement libre. ‡ Rang 2 fait référence au B_h de 305 mm à travers un diamètre de barre de 3 à 12 mm avec un espacement interne et externe respectivement de 35 à 45 mm. § La valeur de J-Ring est déterminée par la différence en hauteur du béton à l'intérieur et l'extérieur du J-Ring.

-
- La fabrication d'un BAP à l'usine demande des compétences plus pointues que celles d'un BCV. Les problèmes principaux se situent au niveau du contrôle de l'humidité des granulats surtout dans le cas du sable, au niveau d'équipements pour le pesage des constituants et au niveau de la quantité d'eau libre pendant le malaxage du béton.
 - Au chantier, nous avons besoin de coffrages plus étanches et plus résistants que les coffrages conventionnels durant la coulée du BAP, afin de réduire l'apparition des nids d'abeille par fuite de la pâte. Ces défauts d'étanchéité concernent des ouvertures supérieures à 3 mm [CUSSIGH, 2007]. Le besoin de coffrages plus résistants est associé à la pression qu'exerce le BAP sur les coffrages, ceci dépend davantage de la fluidité et de la cohésion du BAP.

2.3.2.6 Conclusion

Le BAP présente un ensemble des bénéfices pour la construction d'une variété des infrastructures et son utilisation générale dans l'industrie de la construction. Néanmoins ce type du béton doit concilier une très grande fluidité mais à la fois une bonne stabilité pour conférer une bonne performance et un rapport optimal coût/qualité des structures. C'est pour cette raison que le BAP coûte plus cher à produire à l'usine et demande un contrôle de qualité plus exigeant que dans le cas du BCV.

2.4 Rhéologie du béton

2.4.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie est la science de la déformation et de l'écoulement d'un corps qui établit une corrélation entre cette déformation, la force appliquée au corps et le temps [Wallevik, 2010]. Plus précisément la rhéologie est une branche de la science physique qui étudie l'écoulement ou la déformation d'un corps sous l'effet des contraintes appliquées, en prenant en compte la vitesse d'application de ces contraintes et leur variation au cours du temps [Yahia, 2012]. Nous disons qu'un corps se déforme lorsque nous lui appliquons une force en faisant changer sa forme et sa dimension et qu'un corps coule à une vitesse déterminée, si le degré de déformation change continuellement avec le temps (Figure 2.13) [Huang, 2006].

Des chercheurs et des industrielles considèrent de plus en plus l'application de cette science comme l'un des axes fondamentaux pour la conception de nouveaux produits en ciment et le contrôle de la qualité des bétons existants.

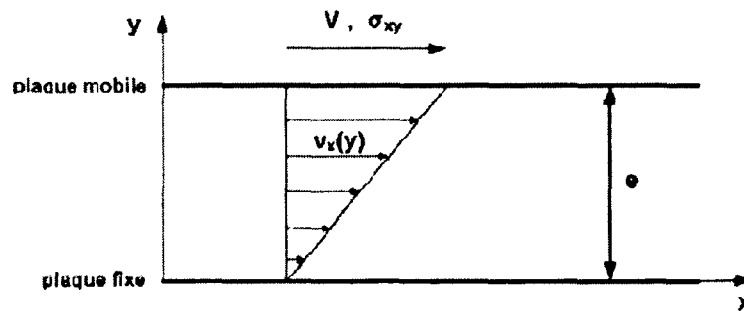


Figure 2.13 : Profil de vitesse pour un écoulement de cisaillement simple d'un liquide newtonien entre deux plans. Le plan supérieur est en mouvement à vitesse V constante [Huang, 2006]

Pour décrire le comportement du béton en face de son écoulement adéquat pour une bonne mise en place, certains termes comme la maniabilité, l'ouvrabilité, la fluidité et la cohésion ont été utilisés de façon individuelle ou combinés, cependant ils sont encore considérés subjectifs ne permettant pas d'obtenir une bonne adéquation entre le béton frais et la méthode de mise en place [Ferraris, 1999]. A titre d'exemple, les essais utilisés habituellement pour évaluer la maniabilité du béton (l'étalement pour le BAP et l'affaissement pour le BCV) donnent des valeurs relatives (single point testers). Nous pouvons alors avoir deux bétons avec la même maniabilité, néanmoins ils peuvent présenter des comportements très différents lorsqu'il faut les mettre en place, les pomper, les consolider ou les conférer de la finition. Pour cette raison, [Tattersall, 1973] a introduit la rhéologie dans l'étude des propriétés des bétons en utilisant un premier appareil, le « two-point workability tester » qui permet d'étudier la maniabilité d'un béton sous l'angle de la rhéologie. C'est donc grâce à cette science physique que nous avançons dans la compréhension du comportement des bétons et dans le progrès pour leur fabrication et leur mise en place.

2.4.2 La rhéologie du béton frais

Des mesures rhéologiques se font actuellement sur béton de ciment grâce à la disponibilité des rhéomètres qui prennent en compte la taille des granulats pouvant aller jusqu'à 20 mm et au fait que le béton n'est pas un fluide homogène [Tattersall, 1991]. Le rhéomètre est un appareil capable de mesurer du couple nécessaire à provoquer la rotation d'une hélice dans le béton à différentes vitesses pour tracer la courbe du couple résistant en fonction de la vitesse de rotation de la palette (tr/min). À partir de mesures obtenues, les deux paramètres rhéologiques permettant la caractérisation du béton sont le seuil de cisaillement et la viscosité plastique (selon le modèle de Bingham).

Le **seuil de cisaillement (τ_0)** est la force de cisaillement nécessaire pour vaincre les frottements internes entre les particules existantes afin d'entraîner son écoulement, ceci se traduit par des mouvements relatifs de ces grains et par la circulation de la phase liquide dans la porosité intergranulaire [Abdellah, 2009]. Le seuil τ_0 se traduit en pratique par la contrainte de cisaillement qu'il faut appliquer pour provoquer la rotation de l'hélice du rhéomètre.

La **viscosité plastique (η)** représente la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse. Khayat la décrit ainsi : « la viscosité d'un fluide est la mesure de sa résistance interne à l'écoulement. Lorsqu'une couche d'un fluide se déplace par rapport à une autre, on doit appliquer une force sur une couche pour la déplacer par rapport à l'autre. Cette force augmente si la friction (viscosité) de ce fluide augmente. » [Khayat, 2008].

2.4.3 Comportement rhéologique et modèles multi-échelles

L'étude du comportement rhéologique d'un béton frais est complexe, car ce matériau est composé de particules des différentes tailles immergées dans l'eau, tels que les particules colloïdales (ciment, fumée de silice, cendre volante, etc.) et les particules non colloïdales solides (granulats). Chaque échelle de particules mentionnées occasionne des interactions différentes entre celles de tailles micrométriques (milieu colloïdal) et centimétriques (milieu non colloïdal) [Yammine, 2007]. Il existe alors différents modèles pour caractériser le comportement rhéologique des suspensions contenant différentes échelles de particules tels que présenté au tableau 2.8.

TABLEAU 2.8 MODÈLES RHÉOLOGIQUES DE SUSPENSIONS [FERRARIS, 1999]

Description du modèle	Équation
Newtonian [Bartos, 1992]	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham [Tattersall, 1976]	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel and Bulkley [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Power equation [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$ Fluide Newtonien $n > 1$ Fluide pseudo plastique $n < 1$ Fluide dilatant
Von Berg [Von Verg, 1979], Ostwald-deWaele [Tattersall, 1976]	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Eyring [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = a \dot{\gamma} + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = a (\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni et al. [Atzeni et coll., 1983]	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$
Définition de variables	
$\tau =$ Contrainte de cisaillement	$\eta =$ Viscosité
$\tau_0 =$ Seuil de cisaillement	$\dot{\gamma} =$ Vitesse de déformation
$A, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta =$ constants	

Dans le cas des matériaux cimentaires, des travaux de recherche ont été entrepris afin de traiter de la pertinence et d'adapter ces modèles pour décrire le comportement rhéologique des bétons [Atzeni et coll., 1985]. Suite à ces travaux, nous pouvons situer le comportement rhéologique d'un béton frais entre le modèle des corps solides et celui des fluides parfaits. Le modèle de Herschel-Bulkley (Tableau 2.7) permet la meilleure description de l'écoulement des bétons. Néanmoins, le besoin d'identifier les trois paramètres associés (τ_0 , K et η) rend plus difficile et coûteuse leur utilisation. Étant donné que « n » est l'indice de viscosité, nous avons que si $n > 1$, le béton est considéré rhéo-épaississant, et si $n < 1$, il est rhéo-fluidifiant et si $n = 1$, le béton est Binghamien (Figure 2.13). [Tattersall et coll., 1983] considèrent le comportement des bétons frais plus semblable à celui d'un fluide plastique à seuil suivant le comportement Binghamien (Figure 2.14) obtenu à partir du modèle de Herschel-Bulkley (Tableau 2.7).

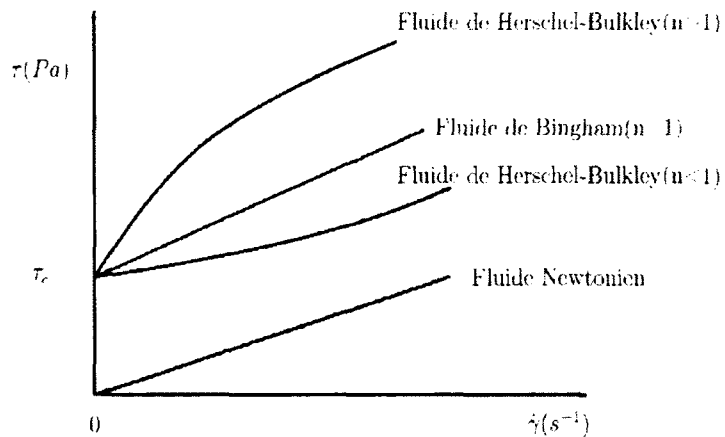


Figure 2.14 Comportement rhéologique des différents corps fluides [Wallevik, 2010]

En ce qui concerne les paramètres rhéologiques des matériaux cimentaires, des valeurs de viscosité et de seuil de cisaillement ont été trouvées pour différents types de mélanges contenant du ciment, tel que présenté au tableau 2.9. [KHAYAT, 2011]. En plus, pour les modèles multi-échelles, à cause de l'existence de différentes échelles granulaires existantes dans les mélanges en ciment, [Toutou et coll., 2003] ont entrepris une étude afin d'évaluer le comportement rhéologique des différentes échelles des particules de béton pour émettre des corrélations entre leur comportements et leur modèles applicables. Les résultats sont résumés par [Yammine, 2007] au tableau 2.10.

TABLEAU 2.9 PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES [KHAYAT, 2011].

Matériaux	Pâte de ciment, coulis	Mortier	Béton fluide	Béton auto plaçant	Béton ordinaire
Seuil de cisaillement (Pa)	10 -100	80-400	400	50-200	500-2000
Viscosité plastique (Pa.s)	0.01-1	1-3	20	20-100	50-100
Rupture structurelle	Significative	Négligeable	aucune	Aucune	aucune

TABLEAU 2.10 IDENTIFICATION DES COMPORTEMENTS ET VALIDITÉS DES MODÈLES [YAMMINE, 2007 À PARTIR DES DONNÉES DE TOUTOU, 2003]

Échelle granulaire	Type de comportement	Modèle applicable
Phase suspensante (nanoparticules)	Visco-plastique du type Bingham	Le seuil d'écoulement est relié au potentiel attractif très élevé des particules colloïdales : modèle de Flatt (2004) valable.
Pâte de ciment	Visco-plastique rhéo-épaississant de type Herschel-Bulkley ($n < 1$)	Les interactions entre particules de ciment sont similaires à celles des nano-particules : modèle de Flatt (2004) valable.
Mortier	Visco-plastique rhéo-épaississant de type Herschel-Bulkley ($n < 1$)	Pour de faibles concentrations en sable, les seuils sont inférieurs au seuil de la pâte de ciment car les interactions granulaires sont encore négligeables et l'effet agitateur par les sables réduit l'état de structuration de la pâte. Pour de fortes concentrations en sable, les seuils sont supérieurs au seuil de la pâte de ciment du fait des interactions granulaires.
Béton (essais réalisés au BTRhéom)	En utilisant une extrapolation du comportement de Bingham	Les seuils sont supérieurs à ceux du mortier car la concentration élevée en graviers joue un effet dominant sur les interactions granulaires. Le modèle d'Ildefonse relie bien le seuil du béton à celui du mortier.

2.4.4 Mesure de la rhéologie du béton

Tel que décrit dans la section 2.4.3, des mesures rhéologiques des bétons ne sont pas facile à réaliser à cause de la composition complexe de particules des constituants, en termes de leur large échelle de tailles (1 mm pour les grains de ciment jusqu'à 20 mm pour les gros granulats ou même jusqu'à 40 mm dans le cas du béton de masse). Il est plus facile d'étudier le comportement rhéologique de la pâte que celle du béton, en utilisant des rhéomètres commerciaux, à cause de la taille des grains de ciment [Wallevik, 2010].

Pour mesurer la rhéologie, il existe des rhéomètres à plans parallèles mais il faut tenir compte la distance entre les plaques du rhéomètre, car celle-ci influe sur la mesure du seuil et de la viscosité. Pour simuler la présence de granulats, nous devons estimer une distance entre ces plaques, ce qui empêche une corrélation directe entre les deux valeurs à mesurer. [Ferraris,

[1999] estime que cet écart doit être de 3 à 5 fois la taille des granulats. Une autre difficulté trouvée c'est que les granulats et le sable contiennent des particules fines qui modifient le comportement des pâtes de ciment et des mortiers. Par conséquent, le mortier évalué seul et le mortier d'un béton n'ont donc probablement pas le même comportement rhéologique. Plusieurs rhéomètres ont été conçus depuis le premier modèle de Banfill, mais il a été difficile de reproduire deux mesures effectuées avec deux rhéomètres différents. C'est à ce titre que l'American Concrete Institute (ACI) a organisé au LCPC de Nantes (en France) en l'an 2000, une étude de comparaison des différents rhéomètres disponibles au marché. Cinq rhéomètres ont été comparés : deux rhéomètres à cylindres coaxiaux (le BML et le CEMAGREF-IMG), un rhéomètre à plaques parallèles (le BTRHEOM), un Two-Points, et un rhéomètre à agitateur (l'IBB). [Ferraris et coll., 2000] ont conclu que les seuils de cisaillement et les viscosités des mélanges étaient dans le même ordre pour tous les rhéomètres. Le degré de corrélation du seuil de cisaillement et de la viscosité était de plus de 95 % pour n'importe quel couple.

2.4.5 La thixotropie du béton

La thixotropie est la propriété d'un fluide à seuil dont la viscosité décroît avec le temps suite à l'application d'une contrainte ou d'une vitesse de cisaillement constante. Après un temps de récupération assez long le système retrouve son état initial, c'est-à-dire, il existe un phénomène physique d'origine colloïdale parfaitement réversible. Dans le passé, ce phénomène a initialement été appelé comme prise anormale des bétons [Roussel, 2008]. Les fluides qui sont thixotropes n'obéissent pas à la loi de Newton, mais ils concernent les fluides plastiques et pseudo-plastiques rhéofluidifiants (non Newtoniens) étant le caractère thixotrope un comportement dépendant du temps, car les modifications de structures microscopiques ne sont pas instantanées [Khayat et coll., 2002]. Les fluides thixotropes ont normalement une viscosité qui diminue avec le temps lorsqu'on applique une contrainte suffisamment élevée à vitesse constante, pour amorcer la déstructuration de la structure. Après suppression de la contrainte appliquée au fluide, la viscosité retourne à sa valeur initiale suivant un temps plus ou moins long appelé temps de restructuration. Laisse au repos, le fluide thixotrope va se restructurer jusqu'à avoir l'aspect d'un solide avec une viscosité infinie (Figure 2.15). Dans le cas du béton, la thixotropie ne provient pas du squelette granulaire inerte mais de la pâte de ciment

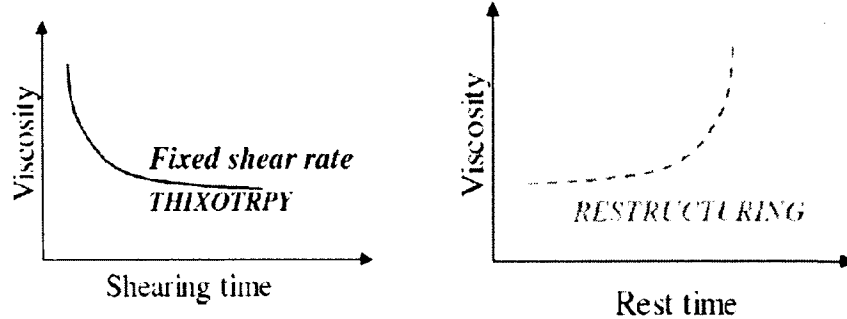


Figure 2.15 Ecrasement de la structure et restructuration dans le temps [44]

L'un des comportements thixotropiques le plus visé au service de l'ingénieur pour l'optimisation du calcul de coffrages est celui de la pression des bétons lors de leur mise en place, ceci sera ensuite étudié plus en détail. Les travaux d'Assaad et coll. [2003, 2004, 2005 et 2006] ont révélé que les pressions sur les coffrages des BAP étaient inférieures aux pressions hydrostatiques calculées par les ingénieurs lorsque nous appliquons des faibles vitesses de coulage du béton. À titre d'exemple, nous présentons l'évolution de la pression sur le coffrage d'un BAP après la mise en place, étant cette valeur 10% moindre que celle de la pression hydrostatique (Figure 2.16). Dans le cas d'un BCV, la pression sur le coffrage est fortement inférieure à la pression hydrostatique, car une partie de poids du BCV est reprise par les parois par mobilisation d'une contrainte de cisaillement dont l'intensité est égale au seuil τ_0 du BCV.

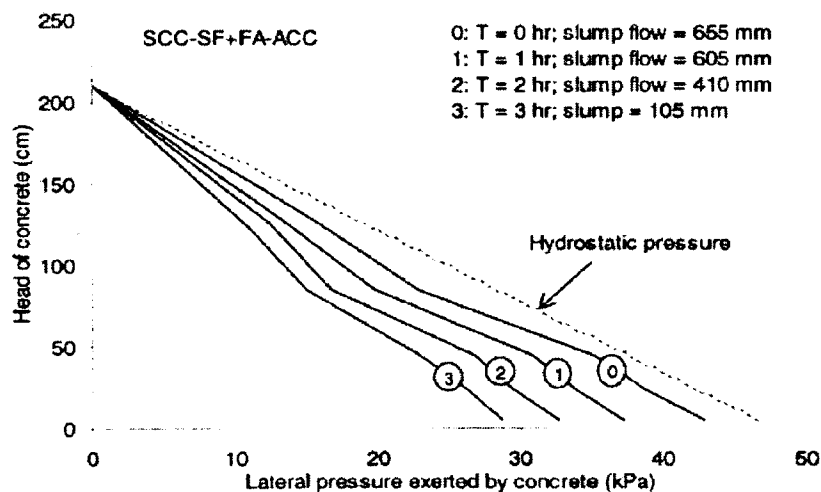


Figure 2.16 Diagramme de pression sur le coffrage d'un BAP [Assaad et coll, 2005]

[Rodin, 1952] a trouvé que les principaux facteurs affectant la pression sur le coffrage sont le taux d'écoulement, la méthode de consolidation par vibration, la température du béton, la prise initiale, le dosage et la fluidité du béton ainsi que les dimensions du coffrage. Il a conclu que lorsque des vibreurs externes sont utilisés, les coffrages doivent être conçus pour une pression hydrostatique d'un fluide ayant le même poids par unité que le béton (Tableau 2.11). [ACI 622] propose que la pression latérale sur le coffrage doit être considérée comme hydrostatique dès la surface supérieure jusqu'à une certaine valeur limite au-delà duquel elle reste constante jusqu'au bas du coffrage. D'autre part, [CIRIA, 1952] a constaté que les facteurs affectant la pression sur le coffrage sont le taux d'écoulement, la fluidité et la température du béton, ainsi que la dimension minimale de coffrage et la continuité de la vibration. La procédure de calcul considère que l'enveloppe de pression latérale est hydrostatique jusqu'à une valeur P_{max} limitée par la teneur faible en armatures dans le béton et les effets de voûte, telle que donnée par les deux équations au tableau 2.11. [Gardner et coll., 1979] ont constaté que l'augmentation du taux de mise en place et de la fluidité entraînent une augmentation de la pression latérale.

TABLEAU 2.11 ÉQUATIONS POUR CALCULER LA PRESSION DU BÉTON

Author	Equation of lateral pressure envelope
Rodin ¹	$H_{max} = 1.63 R^{1/3}$; $P_{max} = 23.4 H_{max}$; and $P_{max} = 17.2 H_{max}$ where H_{max} is head at which maximum pressure occurs, m; P_{max} is maximum lateral pressure, kPa; and R is rate of placing, m/h.
ACI ²	For walls: $R < 2.14$ m/h: $P_{max} = 7.19 + 785R/17.78 + T < 23.5H$ or 95.8; $2.14 < R < 3$ m/h: $P_{max} = 7.19 + 1155/(17.78 + T) + 244R/17.78 + T < 23.5H$ or 95.8; and $R > 3$ m/h: $P_{max} = 23.5H < 95.8$. For columns: $P_{max} = 7.19 + 785R/17.78 + T < 23.5H$ or 143.7 where P_{max} is maximum lateral pressure, kPa; R is rate of pour, m/h; T is concrete temperature, °C; and H is head of concrete, m.
CIRIA ³	Arching criterion: $P_{max} = 14.37 + 0.094d + 3.14R < 24$ h or 143.7 Stiffening criterion: $P_{max} = \frac{\gamma R t}{1 + c \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^4} + (4.6 - 1.89R) < 24$ h or 143.7 where P_{max} is maximum lateral pressure, kPa; d is minimum formwork dimension, mm; R is rate of placing, m/h; t is time after start of placing, h; t_{max} is stiffening time, h; c is vibration constant, and γ is unit weight of concrete, kg/m ³ (c and t_{max} are defined in empirically derived charts).
1-Gardner ⁴ 2-Gardner ⁵	1- $P_{max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400\sqrt{R}}{18+T} + \frac{S-75}{10} < 24$ h 2- $P_{max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400\sqrt{R}}{18+T} + \frac{100}{100-\%F} + \frac{S-75}{10} < 24$ h where P_{max} is maximum lateral pressure, kPa; h is total height of formwork, m; h_i is immersed depth of vibrator not to be less than 1 meter, m; d is minimum formwork dimension, mm; HP is horsepower of vibrator; R is rate of placement, m/h; T is concrete temperature, °C; F is percent of fly ash or blast furnace slag; and S is slump after application of HRWR, mm.

2.5 Étude sur la conception d'un béton semi auto-plaçant (BSAP)

Pendant les dernières deux décennies, des travaux de recherche ont été entrepris au Japon pour la conception des bétons semi-autoplaçants (ou Super workable concrete en anglais) sans vibration mécanique, pour la construction des structures. [Miura et coll., 1994] ont étudié l'influence des ajouts cimentaires sur la maniabilité d'un BSAP sans vibration mécanique, pour un étalement > 550 mm et différents dosages de cendres volantes et du laitier de haut fourneau. Leurs résultats montrent l'importance de hauts remplacements des ajouts sur l'ouvrabilité et la déformabilité du BSAP. À titre d'exemple, des teneurs en laitier de 50% et en cendre volante de 30% ont permis l'amélioration de la maniabilité et la déformabilité par rapport au BAP avec 100% du ciment. [Leclerc, 2010] a développé un béton semi-autoplaçant (BSAP) exigeant une vibration minimale pour la construction de bâtiments et d'infrastructures. Dans son étude de BSAP pour des bâtiments, Leclerc a premièrement étudié la relation entre la rhéologie et la compacité au niveau de la résistance en compression et de la ségrégation. L'utilisation d'un SP, d'un agent colloïdal et le remplacement du ciment GU par la fumée de silice ont initialement été considérés dans les mélanges de BSAP. L'étalement a varié entre 330 à 590 mm, c'est-à-dire de l'étalement d'un BCV fluide à l'étalement d'un BAP. Des valeurs de T_{40} (mesurées de la même façon que le T_{50}) entre 2 et 7 secondes ont été trouvées. Ces valeurs sont très semblables à celles recommandées pour la mesure du T_{50} d'un BAP. Une bande rhéologique ayant un seuil de cisaillement entre une valeur presque nulle (limite du BAP) jusqu'à 246 Pa (qui correspond au seuil d'un BCV) et une viscosité entre 35 à 82 Pa.s ont été trouvées.

Afin d'établir une relation directe entre l'énergie de consolidation appliquée dans les moules cylindriques et la ségrégation induite, des mesures ont été faites sur des échantillons vibrés dans les mêmes conditions (moule 100 x 200 mm consolidés par table vibrante). La mesure montrée dans la figure 2.17 a été réalisée par analyse d'image sur des cylindres sciés. Les granulats ayant au moins une dimension supérieure ou égale à 5 mm ont été repérés sur une feuille de papier transparent collé au cylindre qui a ensuite été numérisé pour être traité informatiquement.

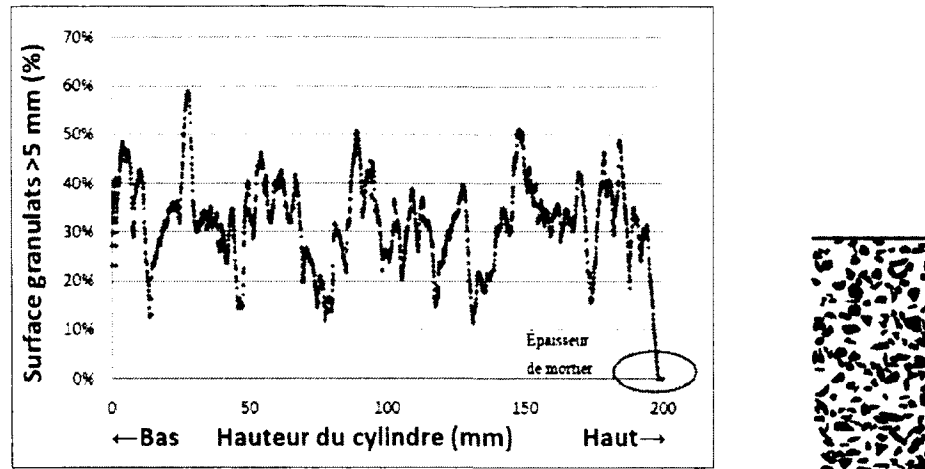


Figure 2.17 Répartition des granulats après vibration du BSAP [Leclerc, 2010]

[Leclerc, 2010] a trouvé que les BSAP nécessitent globalement de 30 à 70% de l'énergie de consolidation que requière un BCV (étant 40% l'optimale) pour une consolidation adéquate en assurant un bon équilibre entre la rhéologie et la compacité en termes de résistance en compression et de ségrégation. Concernant la ségrégation sous l'effet de la consolidation, elle est négligeable pour des mélanges de BSAP proches du BCV ayant un étalement inférieur à 400 mm, même pour des faibles viscosités et sous une longue durée de vibration. En plus, pour les mélanges dont l'étalement est plus important et jusqu'à la limite du BAP, il semble que c'est la viscosité plutôt que le seuil de cisaillement qui contrôle la ségrégation du béton. [Leclerc, 2010] a Postérieurement étudié les protocoles d'essai et d'échantillonnage du nouveau BSAP. Ces protocoles sont considérés dans la conception du BSAP pour des infrastructures (BSAP-I). Dans le cas de l'essai de l'étalement, une valeur optimale de 10 coups / 1 couche a été trouvé, en assurant un bon équilibre entre la résistance en compression à l'état durci et la stabilité du nouveau BSAP. Pour évaluer la capacité de remplissage, l'essai de J-Ring a été conduit considérant huit barres d'acier lisses de 200 mm de hauteur pour les mélanges de BSAP ayant une taille maximale de granulats entre 14 et 20 mm. L'utilisation de l'essai L-Box ayant 1 ou 2 barres et un temps de vibration entre 5 et 10 secondes (figure 2.18) a permis de bien caractériser ce béton prêt à l'emploi pour le bâtiment. Finalement, nous présentons dans la figure 2.19 un résumé des protocoles établis pour l'évaluation des propriétés rhéologiques à l'état frais et le prélèvement des éprouvettes pour le BSAP.

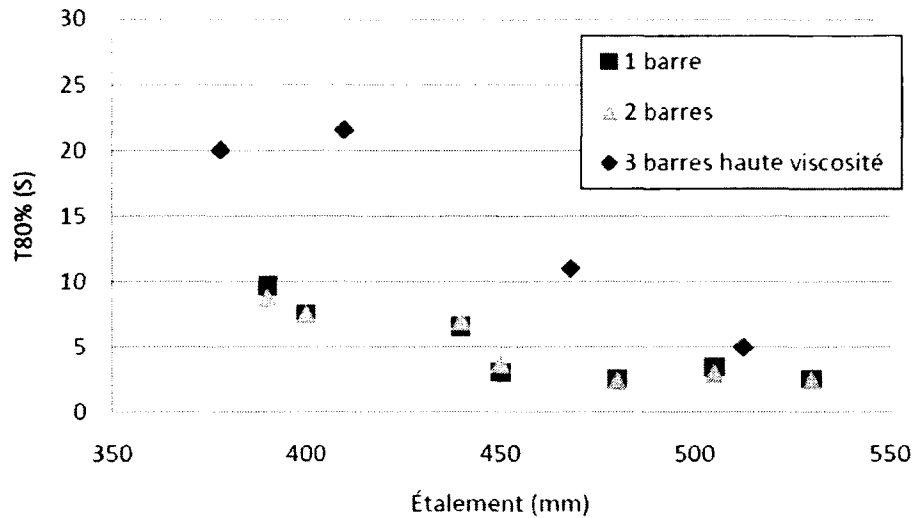


Figure 2.18 T_{80} nécessaire pour obtenir 80% de niveau de remplissage [Leclerc, 2010]

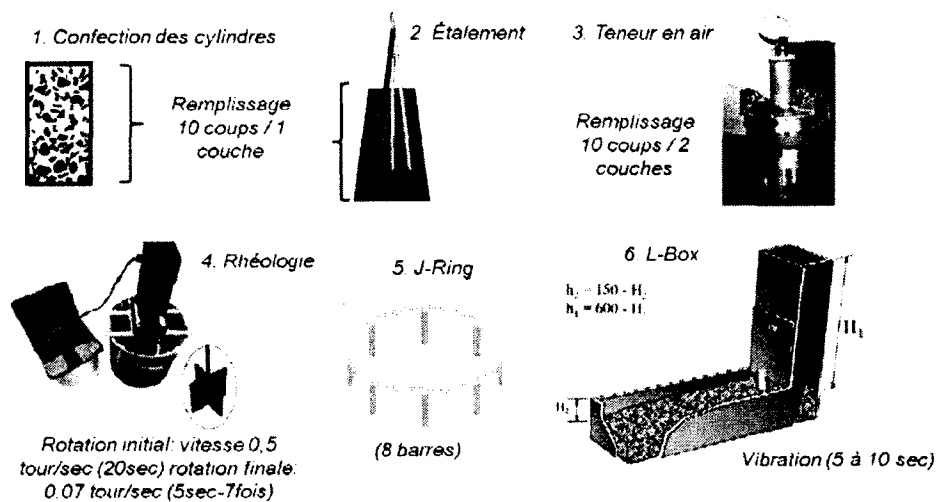


Figure 2.19 Protocoles d'échantillonnage du BSAP [Leclerc, 2010]

2.6 Conclusion

Il a été possible de concevoir des protocoles d'essais et d'échantillonnage d'un BSAP pour la construction des bâtiments en appliquant une vibration minimale, ceci permettant d'obtenir un comportement rhéologique proche du BAP. Néanmoins, l'évaluation de la faisabilité de ces protocoles est recommandée dans le cas de mettre en œuvre la caractérisation d'un béton semi-autoplaçant pour la construction des infrastructures (BSAP-I) afin que ce type de béton soit capable de concilier une grande fluidité mais à la fois une bonne stabilité pour conférer une bonne performance structurel et un rapport optimal coût/qualité des infrastructures

Chapitre 3

3 Programme expérimental et procédure d'essais

3.1 Introduction

Cette étude fait partie d'un projet intégral pour la conception des bétons semi-autoplaçants (BSAP) pour des bâtiments et des infrastructures. Le projet est divisé en deux étapes : une première étape, deux phases de travail ont été développées dans le cadre de la chaire industrielle du CRSNG sur les BHP fluides à rhéologie adaptée. Les phases I et II faisant l'objet d'une étude sur la relation entre la rhéologie et la compacité des BSAP en termes de résistance en compression et de ségrégation (Phase I) et sur les protocoles d'essais et d'échantillonnage des BSAP (Phase II) ainsi que l'optimisation de ce type de béton pour la construction des bâtiments. Le rapport technique concernant ces deux phases mentionnées fait partie du mémoire de maîtrise de [Leclerc, 2010]. Dans une deuxième étape, les phases III.1 et III.2 faisant l'objet d'une étude sur les essais préliminaires pour la caractérisation des BSAP-I à partir des protocoles d'essais et d'échantillonnage mentionnés ci-dessus (Phase III.1) et sur l'optimisation des BSAP-I en modélisant l'effet des différents paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais et durci à l'aide d'un plan d'expériences (Phase III.2). Cette dernière étude fait partie des travaux de recherche présentés dans ce mémoire de maîtrise.

3.2 Présentation du plan expérimental

Cette section présente une récapitulation des deux phases de travail établies dans notre étude (Phases III.1 ET III.2), tel que présenté ci-dessous :

Phase III.1 : Essais préliminaires à l'usine et au chantier

Phase III.1A Pré-validation des BSAP-I à l'usine (Simulation de transport au chantier)

Phase III.1.B Validation des BSAP-I à l'usine (Simulation de pompage du béton)

Phase III.1.C Caractérisation et instrumentation du BSAP-I optimisé au chantier

La phase III.1 est consacrée à la mise en œuvre des essais préliminaires pour la caractérisation d'un BSAP-I à partir des protocoles d'essais et d'échantillonnage traités dans le projet de BSAP. Des essais de caractérisation à l'état frais et durci ont été entrepris pour valider deux bétons à l'usine et choisir le BSAP-I optimal pour la mise en place des piliers d'une infrastructure de pont à Sherbrooke. À cet effet, des propriétés rhéologiques ont initialement été mesurées à 10 et 70 minutes dans la phase de pré-validation (Phase III.1A) afin de simuler le temps d'approvisionnement du béton au chantier. En plus, des échantillons ont été prélevés avec différents nombres de pilonnage pour évaluer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité à l'état durci. Des propriétés rhéologiques ont davantage été mesurées avant et après pompage dans la phase de validation (Phase III.1B) pour vérifier le maintien de la maniabilité dans le temps et l'accomplissement des devis techniques indiqués au tableau 2.3. Au chantier, nous avons fait la caractérisation du BSAP-I optimal choisi et nous avons instrumenté un pilier pour suivre le comportement du béton dans le temps (Phase III.1C).

Phase III.2 : Optimisation des BSAP-I

Phase III.2A Plan d'expériences pour évaluer l'effet des paramètres proposés

Phase III.2.B Caractérisation des mélanges optimisés

La phase III.2 est consacrée à l'optimisation de mélanges de BSAP-I en modélisant l'effet de trois paramètres de formulation, tels que le rapport Eau/Liant (E/L), le rapport sable/granulats (S/G) et la teneur en liant (Kg/m^3) à l'aide d'un plan d'expériences. Les propriétés rhéologiques à l'état frais et la résistance en compression à l'état durci sont modélisées. Deux mélanges optimaux de BSAP-I ont été choisis à partir des modèles statistiques obtenus et de l'analyse comparative coût/performance (Phase III.2A).

Finalement, à partir des mélanges optimaux choisis, nous avons entreprise une étude paramétrique des BSAP-I considérant un nouveau type de ciment ternaire et un nouveau SP de la chaire industrielle pour réaliser une caractérisation complète des bétons optimisés à l'état frais et durci (Phase III.2B).

Le cahier de charge établi dans cette étude pour chaque phase de travail ainsi que les normes techniques de références des essais à l'état frais et durci sont présentés au tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 CAHIER DE CHARGE À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI

Norme	Description d'essai	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase		
		III.1A	III.1B	III.1C	III.2A	III.2B		
ASTM C 1064	Température	x	x	x	x	x		
ASTM C 1611	Étalement	x	x	x	x	x		
ASTM C 1621	J - Ring (8 barres)	x	x	x	x	x		
	L - Box (2 barres)	x	x	x	x	x		
ASTM C 138	État frais	Masse volumique	x	x	x	x		
ASTM C 231		Teneur en air	x	x	x	x		
		Seuil de cisaillement	x	x		x	x	
		Viscosité plastique	x	x		x	x	
ASTM C 1610		Thixotropie au repos		x				
		Colonne de ségrégation		x				
		Tassement de surface		x				
ASTM C 39	État durci	Resistance en compression (1, 28 et 56 j)	x	x	x	x	x	
ASTM C 78		Résistance en flexion (56j)						x
ASTM C 469		Module d'élasticité (56j)		x				x
ASTM C 157		Retrait par séchage						x
ASTM C 1202		Ion chlore (28 et 56j)		x				x
ASTM C 672		Écaillage (56j)		x				x
ASTM C 666		Gel / dégel		x				
ASTM C 457		Réseau des bulles d'air		x				X

Phase III.1.A : Pré-validation des BSAP-I à l'usine (Simulation de transport au chantier)

Phase III.1.B : Validation des BSAP-I à l'usine (Simulation de pompage du béton)

Phase III.1.C : Caractérisation et instrumentation du BSAP-I optimal au chantier

Phase III.2.A : Plan d'expériences pour évaluer l'effet des paramètres proposés

Phase III.2.B : Caractérisation des mélanges optimisés

3.3 Matériaux utilisés

3.3.1 Ciment

Deux types de ciment ont été utilisés dans cette étude. Dans la phase III.1 et la phase III.2A, un ciment ternaire de type GUb F/SF contenant du ciment Portland, de la cendre volante et de la fumée de silice a été utilisé, tandis que dans la phase III.2B un ciment ternaire de type GUb S/SF contenant du ciment Portland, du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice [ASTM C 1157] a été considéré. Le but de leur utilisation est de rendre les BSAP-I plus écologiques et de contribuer au développement durable. Les propriétés physiques et chimiques des ciments utilisés sont présentées dans le tableau 3.2

TABLEAU 3.2 COMPOSITION CHIMIQUE ET PHYSIQUE DES CIMENTS

Composition Chimique	Type de ciment	
	GUb F/SF	GUb S/SF
SiO ₂	32,1	27,2
Al ₂ O ₃	9,3	5,5
Fe ₂ O ₃	5,0	2,2
CaO	45,0	53,3
MgO	1,0	4,6
SO ₃	2,7	4,0
Perte au feu ($\leq 6,0$ %)	2,5	1,5
Alcalis équivalent*	0,82	0,80
*Na ₂ O équivalent = 0,658 K ₂ O + Na ₂ O		
	Propriétés physiques	
Densité	3,00	3,05
Surface spécifique Blaine (m ² /kg)	451	459
Retenu 45 μ (≤ 24 %)	10	6,2
Expansion dans autoclave ($\leq 0,80$)	0,04	0,006
Expansion dans l'eau ($\leq 0,020$)	0,002	-
Temps de prise initial (≥ 45 et ≤ 480 minutes)	155	145
Temps de prise final	250	-
f'c 3 jours (MPa)	21,3	23,6
f'c 7 jours (MPa)	27,9	31,8
f'c 28 jours (MPa)	47,0	49,1

3.3.2 Granulats fins

Le sable naturel provenant de la carrière St-Dominique au Québec a été utilisé pour la fabrication des mélanges de BSAP-I. Il s'agit d'un sable siliceux ayant un diamètre entre 10 et 0,080 mm. Ses propriétés physiques sont présentées au tableau 3.3 et sa courbe granulométrique est montrée dans la figure 3.1.

3.3.3 Gros granulats

Les gros granulats utilisés sont des matériaux concassés provenant de la carrière St-Dominique au Québec. Ces granulats ont un diamètre nominal maximal respectivement de 14 et 20 mm. Leurs propriétés physiques sont présentées au tableau 3.3 et leur courbe granulométrique sont montrées dans les figures 3.2 et 3.3.

TABLEAU 3.3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS

Description du granulat	Densité brute sec	Densité (S.S.S)	Absorption (%)	Module de finesse	Fuseau ASTM C33 (Référence)
Sable 0 - 5 mm	2,61	2,65	1,265	2,61	
Pierre 5 - 14 mm	2,71	2,74	0,43	6,25	7
Pierre 10 - 20 mm	2,69	2,72	0,34	7,08	

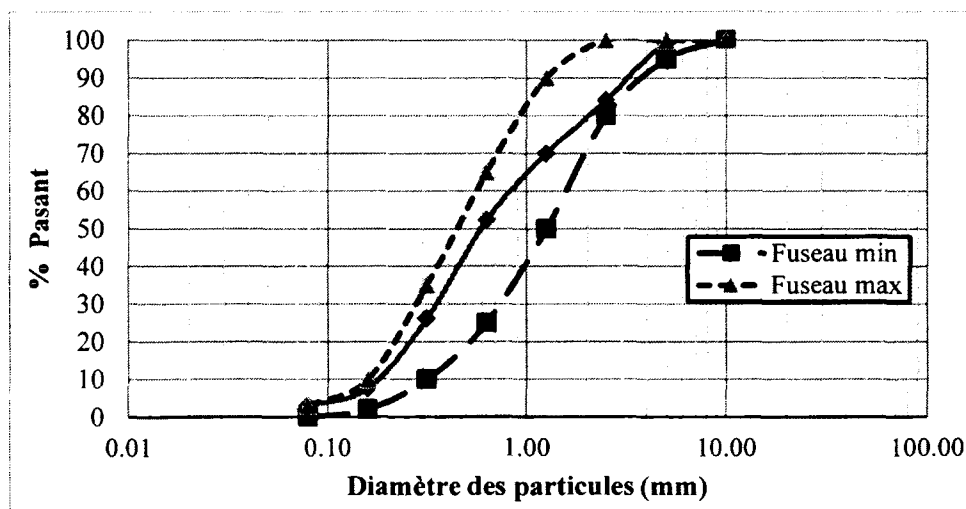


Figure 3.1 Courbe granulométrique du sable

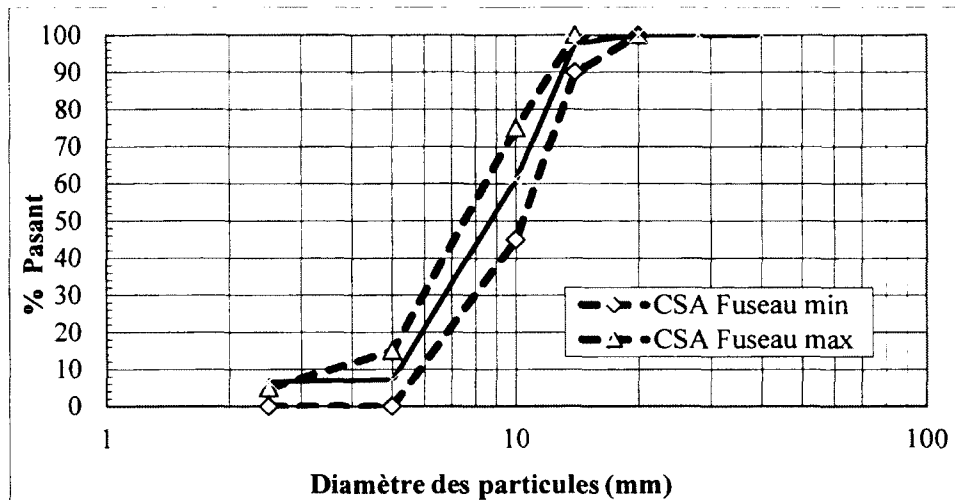


Figure 3.2 Courbe granulométrique de la pierre 5 - 14 mm (Fuselage 7 ASTM C33)

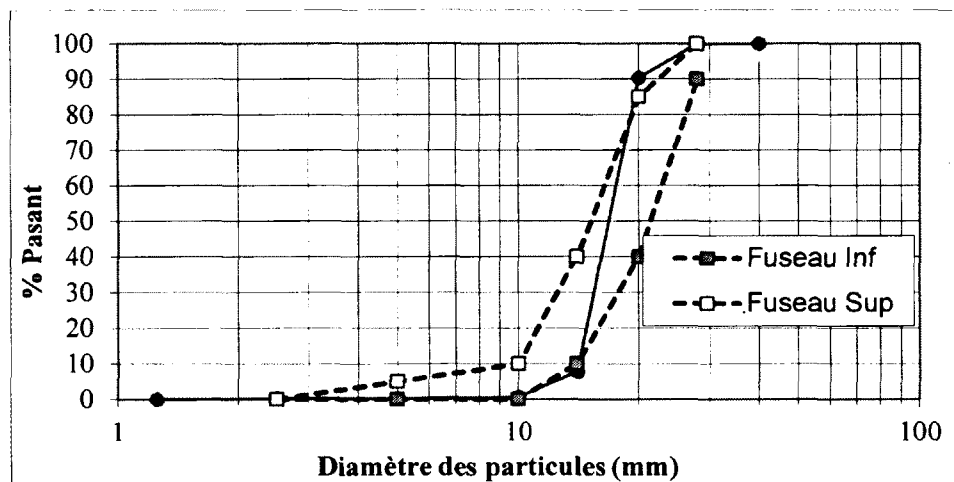


Figure 3.3 Courbe granulométrique de la pierre 10 - 20 mm

3.3.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des mélanges de BSAP-I est une eau potable provenant de la ville de Sherbrooke lieu Est exempte de toute impureté pouvant compromettre les propriétés du béton. La température de l'eau de gâchage varie entre 5°C l'hiver et 24°C l'été.

3.3.5 Adjuvants chimiques

Les adjuvants chimiques utilisés pour les mélanges de BSAP-I sont le SP Eucon 37 de type Polynaphthalene sulfonates (PNS), le plastifiant réducteur d'eau Eucon DX de type

acide hydroxyde-carboxylique, un AEA Aire extra composé de sels sulfonés d'hydrocarbures sans chlorure et un AC Euco Nivo composé à base de polysaccharides fabriqués à partir d'une fermentation de micro-organismes. Les teneurs en adjuvants sont optimisés pour atteindre les propriétés visées. Par exemple, l'AEA a été utilisé pour entraîner un réseau de bulles d'air uniformément réparti dans la matrice cimentaire et améliorer la résistance du béton à l'écaillage et au gel et dégel. Les propriétés physiques et la phase associée à l'utilisation des adjuvants sont indiquées au tableau 3.4

TABLEAU 3.4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ADJUVANTS CHIMIQUES (EUCLID CANADA)

Description de l'adjuvant	Densité	Teneur en solides (%)	Phase d'utilisation	Norme ASTM de référence
Eucon 37	1,140	39,0	III.1 (A, B et C), III.2 (A et B)	C494, types A et F
Eucon DX	1,150	28,5	III.1 (A, B et C), III.2 (A et B)	C 494, type A
Plastol 6400	1,090	38,0	III.2B	C494, type F
Euco Nivo			III.1 (A, B et C)	----
Air extra	1,007	10,7	III.1 (A, B et C), III.2 (A et B)	C 260

3.4 Formulations des bétons semi-autoplaçants BSAP-I

Les formulations de BSAP-I sont décrites dans cette section pour chacune des deux phases qui font partie du programme expérimental.

3.4.1 Phase III.1 Faisabilité (Essais préliminaires) d'un BSAP-I à l'usine et au chantier

En prenant en compte les devis techniques des partenaires de la chaire industrielle du CRSNG (Tableau 2.3), deux mélanges de BSAP-I proportionnés avec des gros granulats (MSA) respectivement de 14 et 20 mm ont été proposés pour une validation à l'usine et le choix du béton pour la mise en place des piliers de pont du projet de contournement sud de l'agglomération de Sherbrooke dans le prolongement de l'autoroute 410 (ville de Sherbrooke). Les dosages par m³ des mélanges proposés sont présentés dans le tableau 3.5

TABLEAU 3.5 DOSAGE PAR M³ DES BSAP-I PROPOSÉS (PHASE III.1)

DESCRIPTION	M1	M2	Unité
	MSA-20mm	MSA-14mm	
Ciment GUb F/SF	420	420	kg/m ³
Eau	157	160	l/m ³
Pierre 5 - 10mm	283	560	kg/m ³
Pierre 10 - 20mm	527	240	kg/m ³
Sable	870	865	kg/m ³
Agent entraîneur en air	250	250	ml/100kg liant
Réducteur d'eau	230	230	ml/100kg liant
Superplastifiant	1476	1547	ml/100kg liant
Agent colloïdal	119	119	ml/100kg liant
Spécification technique			
Étalement (mm)	500 ± 50	500 ± 50	mm
% air	6 - 9	6 - 9	%
E/L	0,37	0,37	
S/G	52 - 48	52 - 48	%
Gros granulats 5-14 mm/10-20 mm	35 - 65	70 - 30	%
Masse théorique	2257	2245	kg/m ³

3.4.2 Phase III.2A Plan d'expériences 2³

3.4.2.1 Principe du plan d'expériences

La technique du plan d'expériences constitue un outil de portée universelle qui facilite l'organisation d'acquisition de connaissances, étant applicable aux différents domaines, tels que la recherche, l'industrie, le contrôle de la qualité des matériaux et la vie familiale. Cette technique statistique basée essentiellement sur des régressions minimise le nombre d'expériences sans sacrifier la qualité des résultats et permet le développement des modèles mathématiques [Goupy; 1988]. Le plan d'expériences est de plus en plus utilisé dans le domaine de la recherche en béton, en permettant en un nombre minimum d'essais l'obtention du maximum d'information par rapport aux facteurs influents ainsi que leurs interactions.

3.4.2.2 Le plan d'expériences choisi

Du point de vue de la formulation, les mélanges de béton destinés pour la mise en place des infrastructures exposées au milieu marin ou aux conditions sévères du climat, ils ont tendance de se dégrader à cause de la présence des agents externes. Ces pénétrations sont favorisées par structure présentant des défauts de nilles d'abeille, des vides ou de perméabilités élevées. Tel que mentionné dans la revue bibliographique, l'un des facteurs importants associés aux défauts mentionnés est la formulation du béton pour conférer un équilibre optimal entre la rhéologie/stabilité et faciliter la mise en place sans vibration mécanique dans le cas d'un BAP ou lorsque nous appliquons de la vibration dans le cas d'un BCV. En ce qui concerne la rhéologie, pour conférer une fluidité adéquate au béton, on utilise un adjuvant. Néanmoins, l'utilisation de dosages élevés de SP augmente le risque de ségrégation, de ressuage ou de tassement de surface. Ainsi, pour réduire ces risques on utilise un AC pour conférer au béton une viscosité adéquate (tel que nous l'avons appliqué pour les deux mélanges de BSAP-I validés à l'usine dans la phase III.1 et au chantier pour la coulée des piliers de pont). Cependant l'incorporation de l'AC réduit la fluidité du béton, étant cet effet plus important avec l'augmentation du dosage d'AC [Yahia, 1999]. À cet effet, deux alternatives sont généralement considérées, l'augmentation de SP (ce qui se traduit en une augmentation du prix du béton et des risques associés à sa stabilité) et l'augmentation du rapport E/L (ce qui est associé à l'augmentation de la perméabilité et à la réduction des propriétés mécaniques du béton).

Afin de trouver l'équilibre optimal entre la rhéologie et la stabilité pour la conception du nouveau BSAP-I, le plan factoriel utilisé dans cette étude doit nous permettre de répondre aux questions suivantes :

1. Est-ce qu'il est plus avantageux de varier le rapport E/L au lieu d'utiliser des teneurs en SP élevées?
2. Est-ce qu'il est favorable aussi de varier la teneur en liant et le rapport S/G pour maximiser la fluidité du béton en réduisant le dosage de SP?

Pour répondre aux questions précédentes, un plan factoriel simple de trois paramètres à deux niveaux 2^3 a été choisi pour évaluer les effets des facteurs étudiés ainsi que l'interaction entre eux et pouvoir optimiser la conception d'un BSAP-I, en prenant en compte les devis techniques du tableau 2.4. Tel que présenté au tableau 4.5, nous avons choisi comme facteurs les rapports E/L, S/G et la teneur en liant (kg/m^3) pour évaluer leur effet sur la demande en SP, les propriétés rhéologiques à l'état frais, ainsi que la résistance en compression à 1, 28 et 56 jours. Chaque facteur mentionné est fixé à deux niveaux (-1) et (+1).

Tableau 4.5 Valeurs des paramètres étudiés pour les mélanges de BSAP-I (Phase III.2A)

Paramètres	Valeur absolue	Valeur codée
E/L	0,34 – 0,40	-1 – 1
S/G	0,47 – 0,53	-1 – 1
Dosage en liant (kg/m^3)	370 - 430	-1 – 1

Le modèle statistique est appliqué autant à l'intérieure que sur les frontières du domaine expérimental modélisé. Le nombre des mélanges est calculé initialement par l'équation :

$$N_f = 2^n \quad (3.1)$$

Dont, N_f est le nombre des mélanges factoriels et « n » est le nombre des paramètres étudiés.

Pour l'analyse statistique, on essaie de satisfaire le modèle linéaire au domaine expérimental défini par (+1 à -1). Sachant que certaines réponses ne varient pas linéairement on élargie le domaine expérimental pour que ces frontières soient entre (+1,68 et -1,68) tel que montré dans la figure 3.4. Dans ce cas, les modèles établis sont quadratiques et l'équation utilisée pour élargir le modèle est donnée par :

$$\text{Valeur codée} = (N_f)^{0,25} = (8)^{0,25} = 1,68$$

Dans le cas d'un modèle quadratique, un plan composite contenant un nombre d'essais définie par la somme des variables : $N_F + N_0 + N_A$, dont N_0 représente le nombre d'essais au centre (dans notre cas égal à 4), N_A représente le nombre d'essais en étoile défini par le facteur 2^n est nécessaire. Dans notre cas $N_A = 2^{(3)} = 8$.

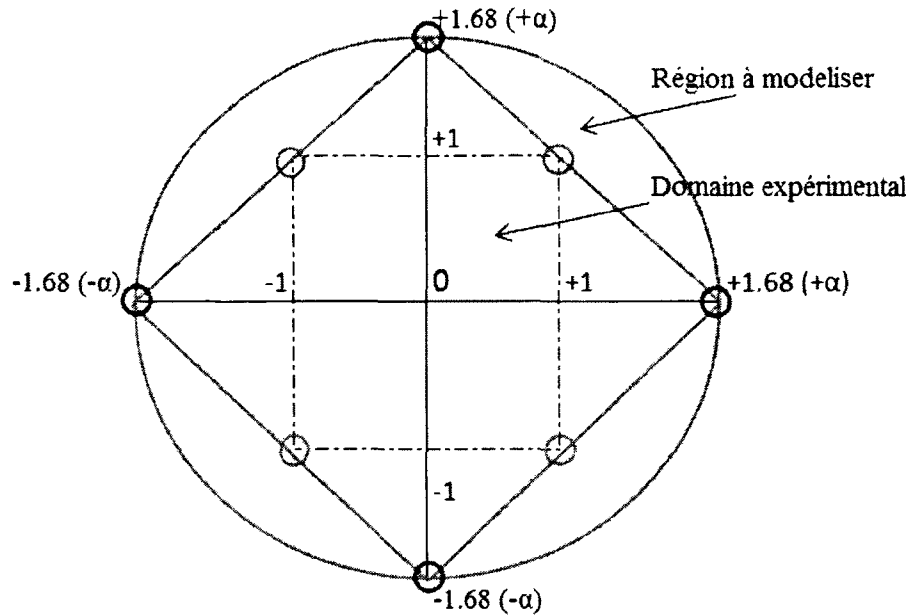


Figure 3.4 Domaine expérimental du plan d'expériences 2^3

3.4.2.3 Mélanges de BSAP-I étudiés

En résumé, nous avons huit mélanges qui correspondent au plan complet 2^3 (mélanges 1 à 8). Ensuite, six mélanges qui correspondent à la partie en étoile (mélanges 9 à 14 avec α variant de $-1,68$ à $+1,68$), quatre points centraux établis (mélanges 15 à 18). Finalement nous avons quatre mélanges complémentaires (mélanges 19 à 22) qui ont été préparés pour évaluer la fiabilité des modèles. Les formulations associées pour chaque mélange de BSAP-I préparé sont décrits au tableau 3.6.

Les paramètres fixes étudiés dans le cadre du plan d'expérience sont les suivants:

- Liant : GUB F/SF (liant ternaire avec fumée de silice et cendre volante)
- Taille maximale des granulats (MSA) = 20 mm
- Granulats : 70% de 5 - 14 mm et 30% de 10 - 20 mm pour optimiser le coût de BSAP-I
- Étalement : 500 ± 25 mm
- Teneur en air : 5 à 8%
- Adjuvants : PNS (EUCON 37) + AEA (AIRE EXTRA) + réducteur d'eau (EUCON DX).
Éventuellement un agent colloïdal est utilisé pour améliorer la stabilité du BSAP-I.

Ces paramètres fixes combinés aux paramètres du plan d'expérience ont permis de formuler les mélanges de BSAP-I qui sont présentés dans le tableau 3.6.

3.4.2.4 Transformation des paramètres en valeurs codées

La transformation des paramètres étudiés en valeurs codées permet de simplifier l'analyse des réponses mesurées lorsque nous utilisons la même amplitude d'influence. Cette transformation des paramètres en valeurs consiste à attribuer -1 au niveau inférieur du paramètre, tandis que pour son niveau supérieur on utilise +1. Dans notre cas, les paramètres étudiés ont été transformés en valeurs codées en utilisant l'équation suivante :

$$\text{Valeur codée} = \frac{\text{valeur absolue} - \text{valeur centrale}}{\text{Le pas de variation}}$$

Ainsi, les valeurs codées pour chaque paramètre à l'intérieure du domaine statistique se calcule comme suit :

$$\text{Valeur codée pour Liant} = \frac{\text{valeur absolue} - (430 + 370)/2}{(430 - 370) / 2} = \frac{\text{valeur absolue} - 400}{30}$$

$$\text{Valeur codée pour S / G} = \frac{\text{valeur absolue} - (0,53 + 0,47)/2}{(0,53 - 0,47) / 2} = \frac{\text{valeur absolue} - 0,50}{0,03}$$

$$\text{Valeur codée pour E / L} = \frac{\text{valeur absolue} - (0,53 + 0,47)/2}{(0,53 - 0,47) / 2} = \frac{\text{valeur absolue} - 0,50}{0,03}$$

Les valeurs codées associées pour chaque mélange de BSAP-I préparé sont aussi présentés dans le tableau 3.6. En plus, nous allons expliquer au chapitre 4 le traitement des données et l'obtention des modèles statistiques en fonction des valeurs codées expliquées.

TABLEAU 3.6 PARAMÈTRES DES BSAP-I PROPOSÉS (PHASE III.2A)

	VALEURS CODÉES			VALEURS ABSOLUES			Vol. Pâte (7% d'air)	
	E/L	Liant	S/G	E/L	Liant	S/G		
BSAPIM1	1	1	1	0,4	430	0,53	395	Plan factoriel
BSAPIM2	1	1	-1	0,4	430	0,47	395	
BSAPIM3	1	-1	1	0,4	370	0,53	349	
BSAPIM4	1	-1	-1	0,4	370	0,47	349	
BSAPIM5	-1	1	1	0,34	430	0,53	369	
BSAPIM6	-1	1	-1	0,34	430	0,47	369	
BSAPIM7	-1	-1	1	0,34	370	0,53	327	
BSAPIM8	-1	-1	-1	0,34	370	0,47	327	
BSAPIM9	1,68	0	0	0,42	400	0,5	380	Plan factoriel (Points en étoile)
BSAPIM10	-1,68	0	0	0,32	400	0,5	340	
BSAPIM11	0	1,68	0	0,37	450	0,5	396	
BSAPIM12	0	-1,68	0	0,37	350	0,5	324	
BSAPIM13	0	0	-1,68	0,37	400	0,55	360	
BSAPIM14	0	0	-1,68	0,37	400	0,45	360	
BSAPIM15	0	0	0	0,37	400	0,5	360	Points centraux
BSAPIM16	0	0	0	0,37	400	0,5		
BSAPIM17	0	0	0	0,37	400	0,5		
BSAPIM18	0	0	0	0,37	400	0,5		
BSAPIM19	1,00	0,50	0,50	0,400	415	0,515	376	Points de validation
BSAPIM20	0,50	1,00	-0,50	0,400	415	0,485	381	
BSAPIM21	-1,00	-0,50	0,50	0,340	385	0,515	332	
BSAPIM22	0,50	1,00	0,50	0,385	430	0,515	379	

3.4.3 Phase III.2B Caractérisation complète des mélanges optimisés

À partir des mélanges optimisés dans la phase III.2A, nous avons réalisé une étude paramétrique considérant l'utilisation d'un nouveau ciment ternaire avec du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice et d'un adjuvant SP de type Polycarboxylate (PCE) de la chaire industrielle du CRSNG pour faire une caractérisation complète à l'état frais et durci selon le cahier de charges indiqué au tableau 3.1. Les paramètres des mélanges préparés sont présentés dans le tableau 3.7.

TABLEAU 3.7 PARAMÈTRES DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)

Code de mélange	E/L	S/G	Ciment GUb F/SF	Ciment GUb S/SF	P	SP-PNS	SP-PCE	AEA
					Eucon DX	Eucon 37	Plastol 6400	Air extra
BSAPI-EPM1	0,40	0,47	430		x	x		x
BSAPI-EPM1B	0,40	0,47	370		x	x		x
BSAPI-EPM2	0,40	0,47		370	x	x		x
BSAPI-EPM3	0,40	0,47	370		x		x	x
BSAPI-EPM4	0,37	0,50	400		x	x		x
BSAPI-EPM5	0,37	0,50		400	x	x		x
BSAPI-EPM6	0,37	0,50	400		x		x	x

3.5 Procédure de malaxage

Le but de malaxer les constituants du béton en appliquant une bonne séquence d'introduction des matériaux à l'intérieur du malaxeur est d'assurer une bonne combinaison entre eux (surtout entre les adjuvants et le ciment à court terme, ainsi que les ajouts et les produits d'hydratation du ciment à moyen terme) pour avoir une masse homogène et conférer au béton des performances les plus élevés. Le malaxage des bétons a été fait à l'aide d'un malaxeur Monarch à axe de rotation vertical d'une capacité de 110 L. La vitesse du malaxeur, l'action des couteaux et du rotor interne ont permis d'avoir une bonne dispersion du ciment et une bonne homogénéisation des constituants. En ce qui concerne la séquence d'introduction des matériaux et le temps de malaxage, ceux-ci sont indiqués au tableau 3.8 pour chaque phase entreprise dans cette étude.

TABLEAU 3.8 : PROCÉDURE DE MALAXAGE DU BSAP-I À L'USINE ET AU LABORATOIRE

TEMPS ACCUMULÉ	SÉQUENCE DE MALAXAGE DANS LE CAMION À L'USINE (Phase III.1)	TEMPS ACCUMULÉ	SÉQUENCE DE MALAXAGE DANS LE MALEXEUR DU LABO (Phase III.2)
40 s	Sable - malaxage 15 s	1,5 minutes	Sable - malaxage 30 s et correction par humidité
	eau de gâchage + AEA - malaxage 10 s		eau de gâchage + AEA - malaxage 30 s
	Gros granulats- malaxage 15 s		Gros granulats- malaxage 30 s
T = 0	Ciment - malaxage 30 s	T = 0	Ciment - malaxage 30 s
T = 0,5 min	SP - malaxage 30 s	T = 0,5min	Plastifiant + eau de gâchage - malaxage 30 s
T = 1 min	AMV - malaxage 3 min	T = 1min	SP - malaxage 3 min
T = 4min	Repos 2 min	T = 4min	Repos 3 min
T = 6min	Malaxage 2min	T = 7min	Malaxage 2min
T = 8min	Début d'essais	T = 9min	Début d'essais

3.6 Procédures d'essais

3.6.1 Étalement

L'étalement est mesuré à l'aide du cône d'Abrams pour vérifier la capacité d'un béton à se déformer sous son propre poids (figure 3.5). Il est réalisé selon la méthode de la norme ASTM C1611 pour le BAP et selon la méthode de la norme ASTM C143 pour le BCV. La principale différence réside au nombre de pilonnage appliqué au béton lorsqu'on remplit le cône. Un pilonnage de 25 coups/ couche est utilisé dans le cas du BCV, tandis qu'aucun pilonnage n'est appliqué dans le cas du BAP. Dans notre cas, un pilonnage de 10 coups/ couche a été utilisé pour le BSAP-I, selon les résultats de protocoles d'essais et d'échantillonnage indiqués dans la figure 2.18.



Figure 3.5 Mesure de l'étalement du béton frais

3.6.2 T_{40}

Cet essai, analogue au mesure de T_{50} pour le BAP, consiste à mesurer le temps nécessaire au béton pour former un cercle de 400 mm de diamètre lors de l'essai d'étalement à partir du moment où le cône est soulevé. Pour un même niveau d'étalement, plus le béton est visqueux et plus il mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur T_{50} sera élevée [Sedran, 1999].

3.6.3 J-Ring

Le J-Ring est également mesuré à l'aide du cône d'Abrams et d'un anneau rigide selon la norme ASTM C1621, pour évaluer la capacité de passage d'un BAP. À travers des obstacles le J-ring est placé autour du cône d'Abrams et l'on mesure le diamètre d'étalement avec la restriction du J-Ring. Un anneau rigide de 300 mm de diamètre contenant 16 barres d'acier lisses de 200 mm de hauteur est considéré comme restriction. Différentes configurations de barres d'acier existent en fonction de la taille maximale du gros granulat utilisé. La capacité de passage est obtenue de la différence d'étalement avec et sans la restriction imposé par le J-ring. Une différence de 0 à 25 mm indique aucun blocage visible, 25 à 50 mm indique un blocage minimale à visible et une différence de plus de 50 mm indique un blocage visible à extrême. Dans notre cas, nous avons utilisé 8 barres (figure 3.6), en prenant en compte les résultats de protocoles d'essais et d'échantillonnage indiqué dans la figure 2.18.

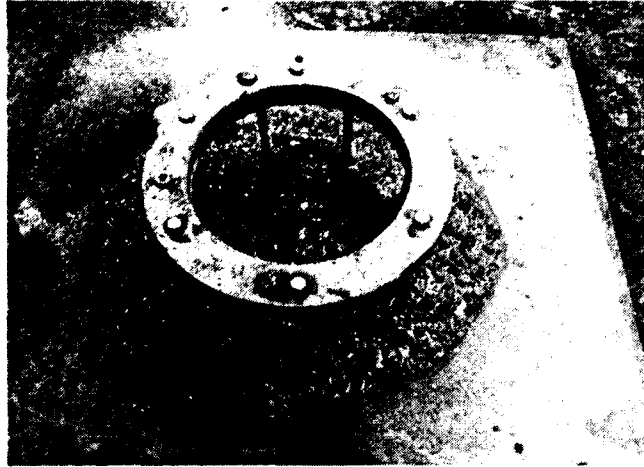


Figure 3.6 Mesure de J-Ring du béton frais

3.6.4 Capacité de remplissage dans la L-Box

L'essai de la boîte L-box permet de décrire la mobilité du BAP en milieu confiné pendant sa mise en place ainsi que sa résistance à la ségrégation dynamique (Figure 3.7). Cet essai consiste à remplir la partie verticale en une seule fois et de le laisser reposer pendant une minute. Après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers 2 ou 3 armatures de $\Phi = 14$ mm distantes de 39 mm (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage présent dans la structure). Nous mesurons la hauteur dans la partie verticale $H1$ et celle dans la partie horizontale $H2$ pour calculer le taux de remplissage $h2/h1$. Pour un rapport supérieur à 0,75, il permet d'avoir un écoulement adéquat du BAP pour les infrastructures [Hwang, 2006]. La capacité de remplissage a été mesurée deux fois dans notre cas : la première fois après l'ouverture de la trappe et l'écoulement du béton (Avant vibration) et la deuxième fois après avoir vibré le béton avec une aiguille vibrante pendant 5 secondes.

3.6.5 Temps d'écoulement L-Box

Nous avons mesuré le temps d'écoulement du béton après ouverture de la trappe pour la L-Box contenant 2 barres. Ce temps a été mesuré pour parcourir 400 mm (T_{400}) et pour atteindre la butée, à l'extrémité de la L-Box ($T_{butée}$).



Figure 3.7 Mesure de la capacité de remplissage dans la boîte L-Box

3.6.6 Capacité de remplissage dans la boîte de remplissage

Pour évaluer la capacité de remplissage du béton, nous avons utilisé une boîte de remplissage transparente en acrylique ayant une dimension de 500 × 300 × 300 mm, munie des tuyaux de diamètre 16 mm qui sont espacés de 34 mm. Cet essai consiste à remplir la boîte transparente de béton jusqu'à une hauteur de 220 mm en utilisant un entonnoir à une vitesse moyenne de 0,2 l/seconde afin que le béton s'écoule entre les tuyaux. La capacité de remplissage (C.R) est alors calculée par le rapport :

$$C.R = A / (A+B) (\%) \quad (3.1)$$

Dont A est l'aire de la zone remplie de béton et B est l'aire de la zone vide.

3.6.7 Masse volumique

La masse volumique du béton est mesurée en utilisant un contenant du volume établi en fonction de la taille maximale des granulats selon la méthode d'essai de la norme ASTM C138 ou CSA A23.2-6C. Dans notre cas, nous avons utilisé le récipient d'un air mètre de 7,02 litres, également utilisé pour déterminer la teneur en air. Le principe de cet essai consiste à tarer ce contenant et le remplir en trois couches de même volume et pilonné à 25 coups par couche à l'aide de la tige en acier dont l'extrémité est hémisphérique. La dernière couche est bien arasée et l'ensemble est pesé sur une balance calibrée à ± 0,1 g. La masse volumique du béton est

obtenue par le rapport entre la masse du béton et le volume du contenant. Dans notre cas, un pilonnage de 10 coups/2 couches a été utilisé pour les BSAP-I, selon les résultats de protocoles d'essais et d'échantillonnage indiqué au tableau 3.11.

3.6.8 Teneur en air

Le volume d'air dans le béton frais est mesuré selon la méthode de pression suivant la norme ASTM C231 ou CSA A23.2-7C. Cet essai a été utilisé dans notre étude en prenant en compte la masse du béton, la fiabilité des résultats et la meilleure adaptation de cet essai au chantier. Le principe de cette méthode repose sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Boyle Mariotte. L'appareil utilisé est un air-mètre gradué en teneur en air (Figure 3.8). La procédure consiste essentiellement à appliquer une pression sur l'échantillon de béton à l'aide d'une pompe. La pression appliquée va comprimer l'air contenu dans le béton. Le volume de l'air comprimé, représentant la teneur en air du béton exprimé en pourcentage, est mesuré et lue directement au moyen d'un manomètre.



Figure 3.8 Mesure de la teneur en air du béton frais

3.6.9 Rhéomètre

Un rhéomètre portatif développé par l'International Center for Aggregate Research (ICAR) à l'université de Texas (figure 3.9) a été utilisé pour mesurer les propriétés rhéologiques des mélanges de BSAP-I. Une vitesse de rotation initiale de 0.5 tour/seconde pendant 20 secondes a été considérée pour éliminer la thixotropie au repos du béton. Ensuite, cinq mesures du

couple nécessaire à la rotation de l'hélice avec une vitesse de 0.07 tour/seconde a été effectuée pendant une période de 30 secondes. Le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (η) ont été calculés initialement par le logiciel livré avec l'appareil à partir de la régression linéaire des points mesurés en utilisant l'équation de Reiner-Rivlin [Koehler et Fowler, 2004]. Après, ils ont été corrigés en fonction des valeurs trouvés lorsque nous essayons le rhéomètre en vide.

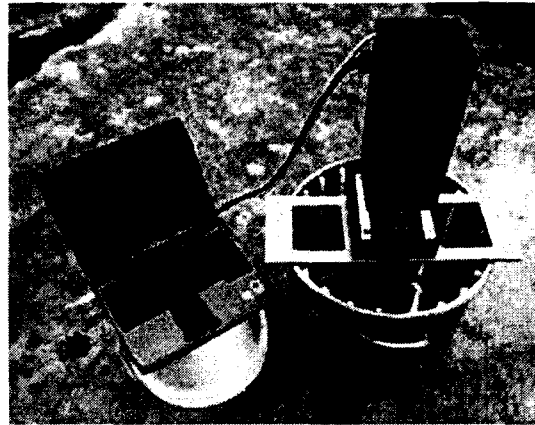


Figure 3.9 Mesure de la rhéologie du béton frais avec le rhéomètre ICAR

3.6.10 Thixotropie au repos avec le scissomètre

Cet essai permet de quantifier le degré de restructuration d'un béton au repos, en mesurant le seuil de cisaillement statique dans le temps pour amorcer son écoulement. Un scissomètre de poche (Portable Vane en anglais) est utilisé pour mesurer le seuil de cisaillement au repos. Nous utilisons quatre contenants de 210 mm de section carrée x 330 mm de hauteur et quatre palettes ayant différentes dimensions et disposées en forme de croix autour d'une tige d'acier inoxydable pour cisainer le béton aux différents temps de repos, tel que montré dans la figure 3.10. La hauteur totale H et rayon r des palettes mentionnées sont les suivantes:

- Palette 1 (La plus grande dimension) : 250 et 37,5 mm;
- Palette 2 : 200 et 37 mm;
- Palette 3 : 149 et 37,5 mm;
- Palette 4 : (La plus petite dimension) 100 et 37,5 mm (3,94 et 1,48 po).

La palette 1 est utilisé au début de l'essai en prenant en compte l'existence d'une faible structuration du béton pendant un temps de repos plus court, alors que la palette 4 est utilisé à la fin pour mesurer la plus grande structuration du béton pendant un temps de repos de plus longue durée. Plus le temps de repos augmente, la contrainte maximale nécessaire pour cisailier le béton augmente, et par conséquent le seuil τ_0 est plus significatif [Omran, 2011]. La procédure de l'essai consiste à centrer verticalement les palettes mentionnées précédemment dans les contenants avec l'aide d'un arrangement fixé dans la base de chaque contenant. On verse le béton à l'intérieur des chaudières, ensuite on les protège avec des tapes plastiques pour éviter l'évaporation de l'eau et pour maintenir les palettes au centre de leurs diamètres. On tourne avec un couple d'un quart de cercle pendant 10 à 15 secondes et on mesure la force maximale du béton au repos (T_{max}) à 15, 30, 45 et 60 minutes. Le seuil τ_0 est calculé en utilisant la formule 3.2, décrite à continuation :

$$\tau_0 = T_{max} / G \quad (3.2)$$

Où $G = 2 \pi r^2 (h + 1/3 r)$ dont h et r sont respectivement la hauteur et le diamètre de la palette.

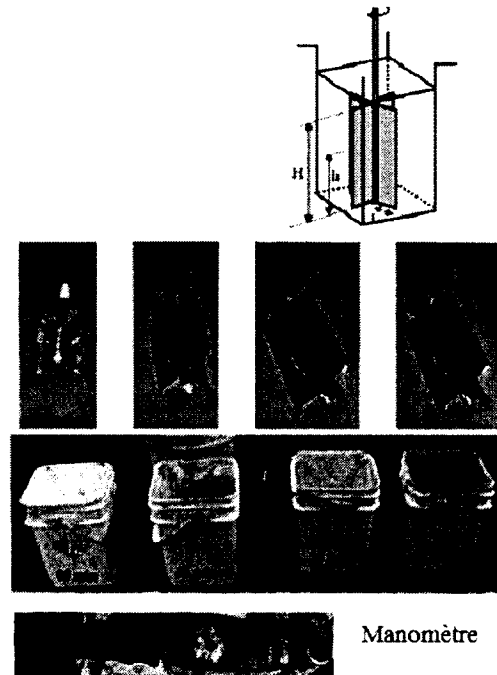


Figure 3.10 Essai de thixotropie au repos [Omran, 2010]

À partir des seuils de cisaillement au repos obtenus à 15 minutes, nous pouvons classer un niveau de thixotropie du béton en utilisant le tableau 3.9.

TABLEAU 3.9 : CLASSEMENT DES INDICES DE RESTRUCTURATION AU REPOS POUR LE SCISSOMÈTRE (PV) ET LE RHÉOMETRE [OMRAN ET COLL., 2011]

Thixotropy classification for SCC mixtures	Initial structural buildup at rest after 15 minutes of rest			Rate of increase in structural buildup at rest with rest time		
	PV $\tau_{0.75\text{Pa}}@15\text{min}$, Pa	Rheo $\tau_{0.75\text{Pa}}@15\text{min}$, Pa	$\Delta\eta_{\text{app}}@0.75\text{Pa}@15\text{min}$, Pa.s	PV $\tau_{0.75\text{Pa}}(t)$, Pa/min	Rheo $\tau_{0.75\text{Pa}}(t)$, Pa/min	$\Delta\eta_{\text{app}}@0.75\text{Pa}(t)$, Pa.s/min
Low thixotropy, L (No. of mixtures)	200 to 550 (20)	200 to 570 (20)	20 to 110 (18)	0 to 25 (16)	0 to 10 (16)	0 to 8 (16)
Medium thixotropy, M (No. of mixtures)	550 to 900 (4)	570 to 940 (4)	110 to 200 (6)	25 to 50 (8)	10 to 20 (7)	8 to 16 (8)
Medium-high thixotropy, MH (No. of mixtures)	900 to 1250 (3)	940 to 1310 (3)	200 to 290 (3)	50 to 75 (2)	20 to 30 (3)	16 to 24 (3)
High thixotropy, H (No. of mixtures)	1250 to 1600 (2)	1310 to 1680 (2)	290 to 380 (2)	75 to 100 (2)	30 to 40 (3)	24 to 32 (2)
Very high thixotropy, VH (No. of mixtures)	1600 to 1950 (1)	1680 to 2050 (1)	380 to 470 (1)	100 to 125 (2)	40 to 50 (1)	32 to 40 (1)
Total no. of SCC mixtures	30	30	30	30	30	30

Nous pouvons aussi calculer un indice de thixotropie du béton en utilisant l'équation 3.3, tel qui suit :

$$\text{Indice de thixotropie (I.T)} = \tau_{15\text{min}} \times R_{\text{SUB}} \text{ (Pa.Pa / min)} \quad (3.3)$$

Où τ_{15} est le seuil de cisaillement au repos à 15 minutes et R_{SUB} est la pente établie par le rapport entre l'écart du seuil de cisaillement au repos et la durée de l'essai.

3.6.11 Colonne de ségrégation

Cet essai permet de mesurer la ségrégation statique du béton frais suivant la norme ASTM C1610. Il s'agit de verser le béton dans une colonne cylindrique en PVC de 200 mm de diamètre et 660 mm de hauteur pour déterminer la variation de la concentration relative des granulats prises dans quatre sections de 165 mm de hauteur chacune et séparées par des joints anti fuites (figure 3.11). Une fois que le béton est versé dans la colonne, il est consolidé par pilonnage (5 coups) à l'aide d'une tige d'acier de 16 mm de diamètre, puis laissé au repos pendant 15 minutes. On récupère les bétons de chaque section du haut vers le bas de la colonne et ceux-ci sont pesés et puis lavés sur un tamis de 5 mm pour séparer le mortier des

granulats. Les granulats sont séchés et finalement pesés. On calcule l'indice de ségrégation du béton (I.S) en utilisant la formule 3.4 suivante :

$$I.S = 2 \times ((CA_B - CA_T) / (CA_B + CA_T)) \times 100 \quad (3.4)$$

Dont CA_B est la masse des granulats de la section en haut et CA_T celle de la section en bas.

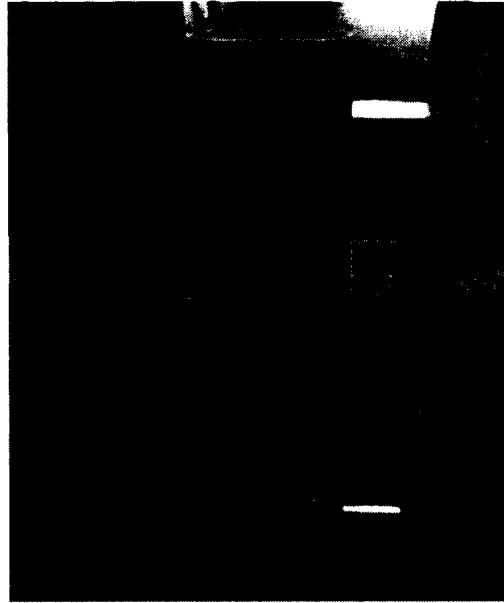


Figure 3.11 Colonne de l'essai de ségrégation [Khayat, 2002]

3.6.12 Ségrégation sur table vibrante

La ségrégation statique du béton a également été mesuré sur des cylindres vibrés dans une table vibrante, afin d'établir une relation directe entre l'énergie de consolidation appliquée au béton et la ségrégation induite par cette table vibrante. Des cylindres normalisés de 100 x 200 mm ont été remplis de béton en une seule couche et vibrés sur la table, tel que montré dans la figure 3.12. Des temps de vibration de 5, 10 et 20 secondes (temps de vibration d'un BCV au chantier), afin de faire varier l'énergie apportée au béton sont considérés.



Figure 3.12 Confection des cylindres sur table vibrante

Des mesures ont été réalisées par l'analyse d'image des cylindres sciés en longueur. Les granulats ayant au moins une dimension égale ou supérieure à 5 mm ont été repérés sur une feuille de papier transparent qui a été collé au cylindre et numérisé pour être traité informatiquement. La bande noire existante au haut du cylindre (figure 3.13) permet d'accéder plus précisément au nombre de pixels en largeur, mais elle n'est pas prise en compte dans l'analyse de ségrégation. Un exemple des résultats obtenus est présenté sur la figure 3.14.

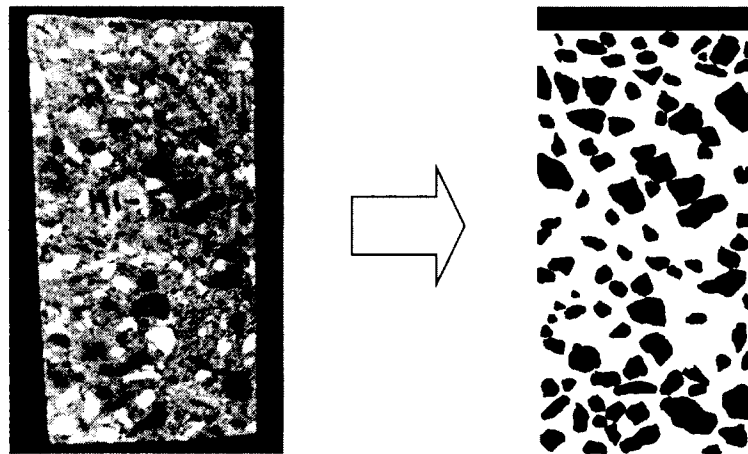


Figure 3.13 Repérage des granulats ≥ 5 mm sur papier transparent

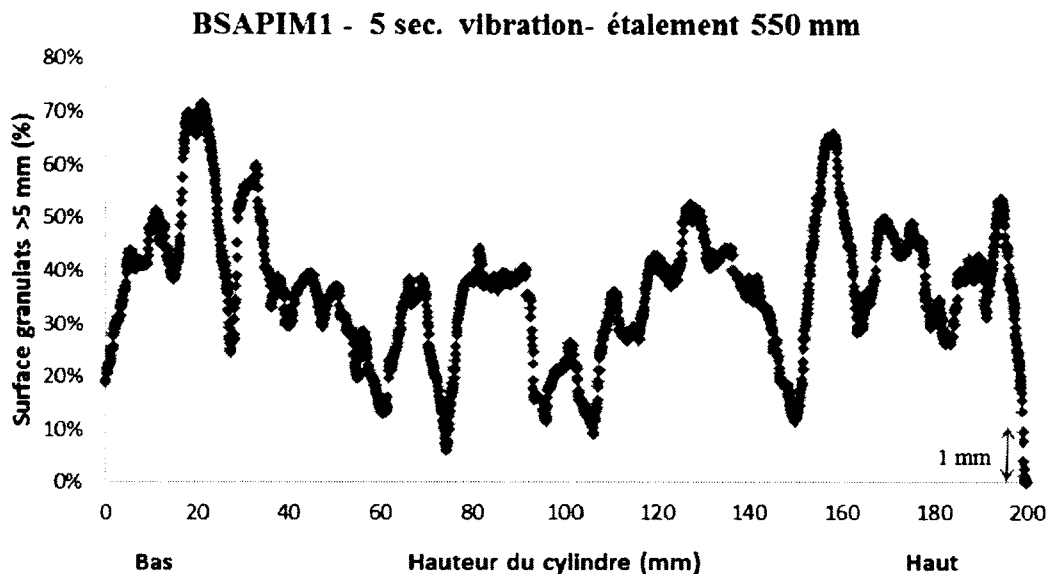


Figure 3.14 Exemple de répartition des granulats après vibration du béton

3.6.13 Pression latérale sur le coffrage

Nous avons déterminé la pression latérale maximale du BSAP-I exercée sur le coffrage d'une structure verticale à l'échelle de laboratoire et au chantier. Pour déterminer la pression latérale exercée par le béton frais au laboratoire, nous avons utilisé une colonne de PVC (Polyvinyle chlorure) ayant une dimension de 1000 mm de hauteur et 200 mm de diamètre interne (figure 3.15). Cette colonne avait une surface intérieure lisse afin de minimiser la friction pendant et après la coulée du béton. La pression latérale a été déterminée à l'aide de cinq capteurs de pression de 100 kPa situés à une distance verticale de 0, 200, 400, 600, et 800 mm de la base de la colonne.

Au chantier, nous avons instrumenté les bétons préparés pour la mise en place des piliers du pont en utilisant aussi cinq capteurs de pression installés sur un coffrage à 3,25 ; 4,00 ; 4,75 ; 5,25 et 5,75 m de profondeur du pilier à construire, afin de mesurer la pression latérale exercée par le BSAP-I sur le coffrage.



Figure 3.15 Mesure de la pression latérale sur le coffrage au laboratoire

3.6.14 Prélèvement des échantillons et mûrissement

Le prélèvement des échantillons a été effectué selon la norme ASTM C192. En ce qui concerne l'énergie de consolidation utilisée dans la confection des cylindres, des plaques et des primes ayant différentes dimensions, nous avons appliqué un nombre de pilonnage équivalent à 40% de celui demandé par les normes ASTM pour un BCV, compte tenu les résultats des protocoles d'essai et d'échantillonnage du projet de BSAP.

Tous les échantillons confectionnés ont été remplis et pilonnés avec une tige en acier de différents diamètres, dont leur extrémité est hémisphérique. Le nombre de pilonnages et de couches appliqués sont indiqués au tableau 3.10. Les échantillons ont bien été arasés et recouverts avec des couvertures de plastique pour éviter l'évaporation de l'eau pendant le mûrissement à l'air. Après l'âge de 24 ± 4 heures, les échantillons sont démoulés et mûris dans une chambre à une température de $23,0 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de 100 % qui sont bien contrôlées jusqu'aux dates d'essais.

TABLEAU 3.10 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DES BAP, BCV ET BSAP-I

Norme ASTM	Description d'essai	Protocole d'essai de BCV et BAP selon norme ASTM		Protocole d'essai BSAP-I (40% énergie de compactage)
C 1611	Étalement	BAP	Pas de pilonnage	10 coups/1 couche
C 1621	J-Ring (8 barres)			10 coups/1 couche
	L-Box (2 barres)			Vibration 5 secondes
C 1610	Rhéologie			25 coups/1 couche
	Colonne de ségrégation			5 coups/1 couche
	Air et Masse volumique	BCV	25 coups / 3 couches	10 coups/2 couches
	Thixotropie au repos	BAP	15, 30 et 45min	15, 30 et 45min
	Tassement de surface			
C31, C39	Résistance en compression à 1, 28 et 56j		25 coups / 1 couche	10 coups / 1 couche
C31, C78	Résistance en flexion 56j	BCV	28 coups / 2 couches	15 coups / 2 couches
C469	Module d'élasticité 56j		10 coups / 1 couche	10 coups / 1 couche
C 157	Retrait par séchage		30 coups/ 2 couches	12 coups/ 2 couches
C1202	Ion chlore 28j		25 coups/2couches	10 coups/2couches
C 672	Écaillage 56j		50 coups/ 1 couche	20 coups / 1 couche
C666	Gel / dégel		38 coups/2 couches	15 coups/2 couches

3.6.15 Résistance à la compression

Nous avons mesuré la résistance à la compression des BSAP-I fabriqués sur des cylindres de 100 × 200 mm selon la norme ASTM C39. Les valeurs de résistance à la compression ont été mesurées à l'âge de 1, 28 et 56 jours et celles-ci établies par le calcul de la moyenne de trois cylindres testés pour chaque mélange de BSAP-I préparé au laboratoire et à l'usine. Le parallélisme des surfaces de cylindres ont été améliorées dans une machine à surfacage afin de favoriser le contact entre les cylindres de béton et les plateaux de la machine à compression durant l'écrasement. Nous avons utilisé une machine de compression (Figure 3.16) ayant une capacité maximale de 250000 lb (1778 kN). Le taux de chargement appliqué sur les cylindres a été de 500 lb/seconde (0,28 MPa/seconde).

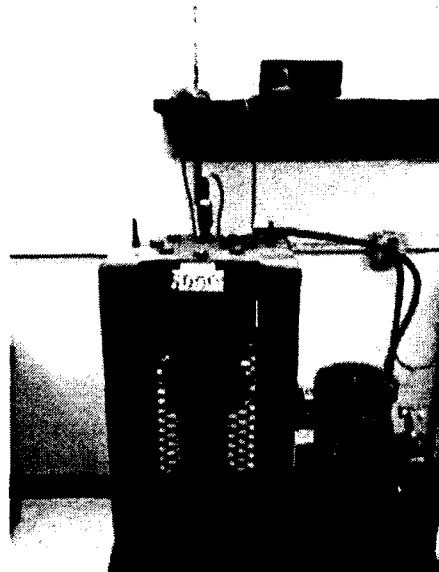


Figure 3.16 Essai de résistance en compression du béton

3.6.16 Module d'élasticité

Cet essai a été effectué sur des cylindres de 100 × 200 mm fabriqués selon la norme ASTM C 469. Il consiste à appliquer une charge en compression pour établir le rapport contrainte/déformation longitudinale de chaque cylindre dans la région élastique de la courbe contrainte/déformation du béton. Le module d'élasticité est calculé avec la formule suivante :

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (3.2)$$

Dont E = module d'élasticité en psi; S_2 = contrainte équivalente à 40 % de la charge ultime; S_1 = contrainte équivalente à la déformation longitudinale; $\epsilon_1 = 0,00005$; ϵ_2 = déformation occasionnée par la contrainte.

3.6.17 Retrait par séchage

Nous avons évalué le retrait par séchage du béton selon la norme ASTM C157M – 04 en mesurant le changement de longueur d'un échantillon dû au séchage dans le temps. Des échantillons de 75 × 75 × 285 mm ont été fabriqués et démoulés à $23 \pm 0,5$ heures pour être directement immergés dans l'eau saturée en chaux durant 30 minutes. Ils sont ressortis pour les lectures initiales et ensuite retournés pour y séjourner durant 27 jours. À partir de 28 jours depuis sa fabrication, les échantillons sont sortis de l'eau une seconde mesure est prise et

finalement les échantillons sont conservés à l'air dans une chambre à une température de 23 ± 2 °C et une humidité relative de 50 ± 4 %. La mesure du retrait est réalisée à l'âge de 4, 7, 14, 28 jours, 8, 16, 32 et 64 semaines à partir de la conservation dans l'air. Les mesures de changement de longueur sont prises au moyen d'un comparateur tel que montré dans la figure 3.17 et le retrait est calculé en pourcentage de la longueur initiale de l'échantillon par la formule :

$$\Delta L_x = (\text{CRD} - \text{Initial CRD}) / G \times 100 \quad (3.3)$$

Dont ΔL_x est le retrait (%); CRD est la lecture du comparateur à l'âge de mesure (mm); Initial CRD est la lecture du comparateur après le démoulage (mm) et G est la longueur initiale de l'échantillon (mm).

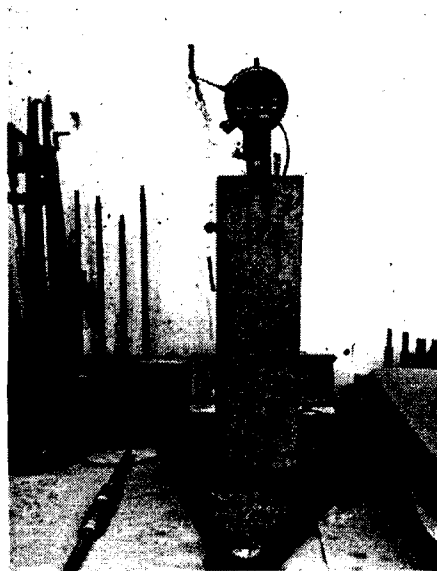


Figure 3.17 Mesure du retrait par séchage

3.6.18 Écaillage

La résistance à l'écaillage des bétons en présence des sels de déverglaçage (solution saline contenant 3% de masse de NaCl) a été mesurée selon la norme ASTM C 672. Pour chaque béton, deux plaques d'au moins 450 cm^2 de surface utile et 75 mm d'épaisseur ont été fabriquées et mûries dans une chambre humide jusqu'à 42 jours. Les plaques sont sorties de la chambre humide après 42 jours d'âge puis conservées à l'air dans une chambre à une

température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$. Le cadrage a été effectué à 49 jours et la solution saline est appliquée pendant 7 jours avant que les cycles de gel-dégel ne débutent à partir de 56 jours. Un cycle de gel-dégel consiste en une période de gel de $17\text{h} \pm 1\text{h}$ à une température de -18°C suivie d'une période de dégel de $8\text{h} \pm 1\text{h}$ à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$. Ce cycle est fait au moins 50 fois sans interruption. La mesure de l'écaillage est effectuée à 5, 10, 15, 25 et 50 cycles. Pour chaque mesure, la surface de la plaque a été rincée avec de l'eau pure afin d'enlever les débris qui sont lavés et filtrés sur un tamis de $80\ \mu\text{m}$, puis séchés à l'étuve et pesés. Les résultats sont exprimés en g/m^2 . Suite à chaque mesure, la surface de la plaque est examinée visuellement et le type d'écaillage est caractérisé selon le tableau 3.11.

TABLEAU 3.11 ÉVALUATION QUALITATIVE DE SURFACE ÉCAILLÉE
[ASTM C 672-03]

Cote	Évaluation visuelle de la surface écaillée
0	Aucun écaillage
1	Écaillage très léger (3 mm) de profondeur. Pas de gros granulats visibles
2	Écaillage léger à modérée
3	Écaillage modérée (quelques gros granulats visibles)
4	Écaillage modérée à sévère
5	Écaillage sévère (gros granulats visible sur la surface totale)

3.6.19 Gel / dégel

La résistance aux cycles de gel / dégel des BSAP-I a été réalisée selon la procédure A de la norme ASTM C 666. Les échantillons ont subi des cycles de gel/dégel dans l'eau. Des prismes de $75 \times 75 \times 350\ \text{mm}$ contenant deux plots sur leurs faces latérales ont été fabriqués. Le premier cycle sur ces prismes a été appliqué à 14 jours et 6 cycles par jour ont postérieurement été considérés à température de $-17,8 \pm 1,7^\circ\text{C}$ à $+4,4 \pm 1,7^\circ\text{C}$, tel que prévu dans la norme. Des mesures de vitesse des ultrasons ont été prises chaque semaine, des pertes de masse et des déformations longitudinales entre les plots ont été mesurées sur les faces opposées des prismes afin de déterminer le facteur de durabilité.

3.6.20 Perméabilité aux ions chlore

Cet essai permet d'évaluer l'interconnectivité des pores existants dans le béton. Il est effectué sur des échantillons de 95 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur selon la norme ASTM C1202. Ces échantillons sont extraits à partir d'un cylindre de 100 mm de diamètre sur 200 mm de hauteur. L'échantillon est placé dans une cellule de telle façon que l'une des faces circulaires baigne dans une solution de 3 % de chlorure de sodium (NaCl) où se trouve une électrode (cathode) émettrice d'électrons. L'autre face circulaire baigne dans une solution de soude (0,3N de NaOH) où se trouve une autre électrode (anode) qui boucle le circuit. Une différence de potentielle (ddp) de 60 volts est maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette (figure 3.18). On mesure la charge électrique totale exprimée en coulombs qui passe à travers l'éprouvette pendant 6 heures. Cette charge mesurée exprime la pénétrabilité des ions chlore à travers l'échantillon. Les résultats sont analysés en prenant en compte les valeurs présentées au tableau 3.12 qui exprime le niveau de pénétrabilité aux ions chlore dans l'échantillon en fonction de la charge obtenue.

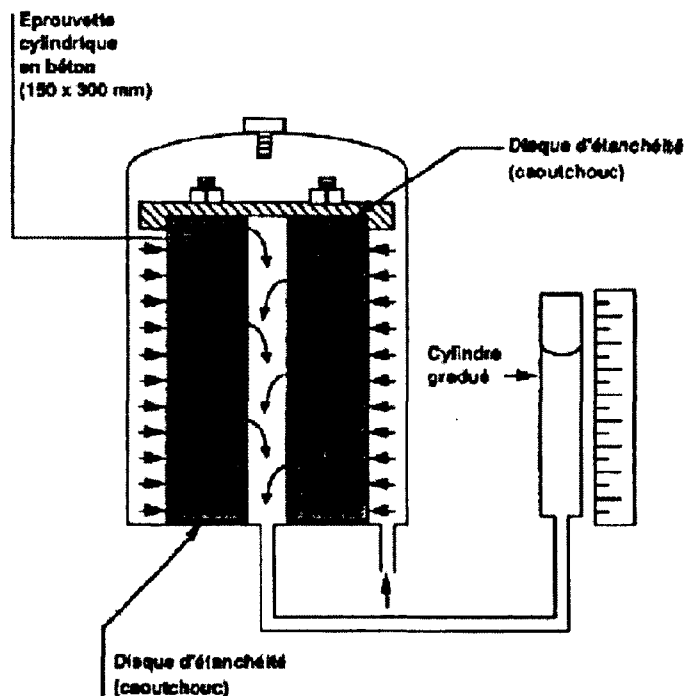


Figure 3.18 Principe de fonctionnement de l'appareil de mesure de la perméabilité à l'eau utilisé à l'Université de Sherbrooke [Notes du cours de durabilité, 2010]

TABLEAU 3.12 NIVEAU DE PENETRABILITÉ AUX IONS CHLORE [ASTM C1202-97]

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

3.6.21 Réseau de bulles d'air

La stabilité du réseau de bulles d'air est un paramètre très important à évaluer dans le béton, afin de le conférer une protection adéquate aux cycles de gel/dégel. Cet essai a été effectué selon la norme ASTM C 457 – 90. À partir d'un cylindre de 100 x 200 mm qui a été prélevé et mûris pendant 14 jours, 2 plaques de 100 x 100 x 20 mm ont été coupées pour déterminer l'espacement des vides interstitiel. Cet essai consiste à mesurer à l'aide d'un microscope optique et à partir d'un réseau de lignes horizontales les caractéristiques du réseau de bulles d'air entraîné dans le béton durci. On mesure le facteur d'espacement L étant ceci la demi distance entre deux bulles d'air. Dans le projet de construction des piliers d'une infrastructure de pont, un espacement \bar{L} max de 230 μm a été demandé pour le mélange de BSAP-I.

Chapitre 4

4 Présentation, analyse et discussion des résultats

4.1 Phase III.1 A et B Essais préliminaires de caractérisation des BSAP-I à l'usine et au chantier

Deux BSAP-I ont été préparés à l'usine chez Demix Béton pour la mise en œuvre des essais de caractérisation à l'état frais et durci pendant les étapes de prévalidation et validation selon le cahier de charges indiqués au tableau 3.1. Ceci nous permettra de choisir le béton optimal pour la coulée des piliers d'une infrastructure de pont à Sherbrooke. Les résultats bruts sont présentés dans les tableaux 4.1 et 4.2.

TABLEAU 4.1 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I (PHASE III.1A, B)

		MSA 20 mm		MSA 14 mm		MSA 20 mm		MSA 14 mm	
		10 min	70 min	10 min	70 min	Avant pomp.	Après pomp.	Avant pomp.	Après pomp.
Température ambiante	°C	5,5	7,3	8	7,5	6	6,3	8,2	8
Température du béton	°C	17,5	18,2	-	-	16,2	15,4	15,9	14,2
Étalement	mm	475	430	550	500	475	470	465	440
T ₄₀	sec	3,2	-	2,2	0,57	1,59	0,69	0,78	1,09
VSI		0	1	0	0	0	0	0	1
J-Ring (8 barres)	mm	500	420	500	420	460	435	460	430
% air	%	7,0	6,3	6,2	6,0	7,5	6,5	6,9	5,6
Capacité de remplissage dans la L-Box	Avant vibration	%	-	-	-	32,8	33,6	36,2	38,5
	Après vibration	%	95,5	98,9	98,9	97,5	100,0	97,8	90,0
T ₄₀₀	sec	-	-	-	-	0,69	5,5	3,9	4,5
Capacité de remplissage dans la boîte	Avant vibration	%	-	-	-	-	42,5	-	44,3
	Après vibration	%	-	-	-	-	79,5	-	74,3
Ségrégation statique	%	-	20,6	-	14,8	-	22,4	-	4,9
Viscosité η	Pa.s	7,8	6,0	12,3	12,7	-	-	-	-
Seuil τ_0	Pa	199	538	99	160	-	-	-	-

TABLEAU 4.2A RÉSULTATS DES RÉSISTANCES F'C (PHASE III.1A ET B)

Âge	Phase III.1A								Phase III.1B			
	20 mm, 5 coups/couche		20 mm, 8 coups/couche		14 mm, 5 coups/couche		14 mm, 8 coups/couche		20 mm, 5 coups/couche		14 mm, 5 coups/couche	
	f _c (MPa)	d2s%-3cyl. (%)	f _c (MPa)	d2s%-3cyl. (%)	f _c (MPa)	d2s%-3cyl. (%)	f _c (MPa)	d2s%-3cyl. (%)	f _c (MPa)	d2s%-3cyl. (%)	f _c (MPa)	d2s%-3cyl. (%)
7	39.6	7.8	39.5	16.1	40.4	5.9	40.0	13.0	39.2	4.6	37.7	11.1
28	50.8	5.2	50.4	3.6	52.6	6.8	51.8	8.7	48.2	8.7	53.2	1.49
56	54.8	2.5	54.8	4.5	55.1	2.0	57.6	1.2	49.0	2.8	53.9	4.0

(*) D2s%-3 cyl. : Dispersion entre trois cylindres d'un même mélange de BSAP-I [ASTM C39]

TABLEAU 4.2B RÉSULTATS DE DURABILITÉ (PHASE III.1A ET B)

BSAP-I	Pompage	L-bar (µm)	Résistance à l'écaillage (kg/m ²)	F. D. Gel/Dégel (%)	Ions chlores (Coulomb)
14 mm	Avant	190	0,20	100	
	Après	170	0,30	100	365
20 mm	Avant	180	0,11	98	
	Après	160	0,32	99	370

4.1.1 Perte d'étalement – J-Ring

En prenant en compte le délai d'approvisionnement du BSAP-I au chantier de 60 minutes, durant l'étape de pré-validation (Phase III.1A) nous avons évalué la perte de fluidité et l'habilité de passage dans le temps des deux bétons proposés. La perte d'étalement et le J-Ring à 10 et 70 minutes sont déterminées. La figure 4.1 présente les résultats obtenus des essais mentionnés. On observe qu'il existe un écart d'étalement très semblable de 50 mm pour les deux BSAP-I ayant une taille maximale de granulats (MSA) respectivement de 14 et 20 mm. Néanmoins, c'est le BSAP-I contenant un MSA de 14 mm qui présente un étalement dans le temps entre 500 et 550 mm, ceci faisant partie de la bande supérieure demandée par le devis technique du projet de pont (500 ± 50 mm – tableau 2.3). Dans le cas des mesures de J –

Ring, on a obtenu des résultats acceptables à 10 et 70 minutes et une diminution de 80 mm après 60 minutes pour les deux BSAP-I préparés à l'usine. En ce qui concerne la différence entre l'étalement et le J-Ring, les résultats obtenus montrent un écart entre ces deux propriétés à 10 et 70 minutes respectivement de 0 et 10 mm pour le BSAP-I ayant un MSA de 20 mm. Ceci est qualifié par la norme ASTM C 1621 comme un béton ne présentant pas de blocage visible, tandis que pour le BSAP-I contenant un MSA de 14 mm on remarque qu'il existe une différence de 10 et 40 mm. Ces valeurs sont qualifiées par la norme ASTM C 1621 ayant un niveau de blocage minimal jusqu'à significatif. Dans tous les cas, il existe une différence entre l'étalement et J-Ring inférieure à 50 mm et ces deux bétons peuvent être considérés comme acceptables. En effet, un BAP présente une bonne capacité à s'écouler à travers les structures possédant des armatures ferraillées si la différence entre ces deux propriétés est inférieure ou égale à 50 mm [Hwang 2006].

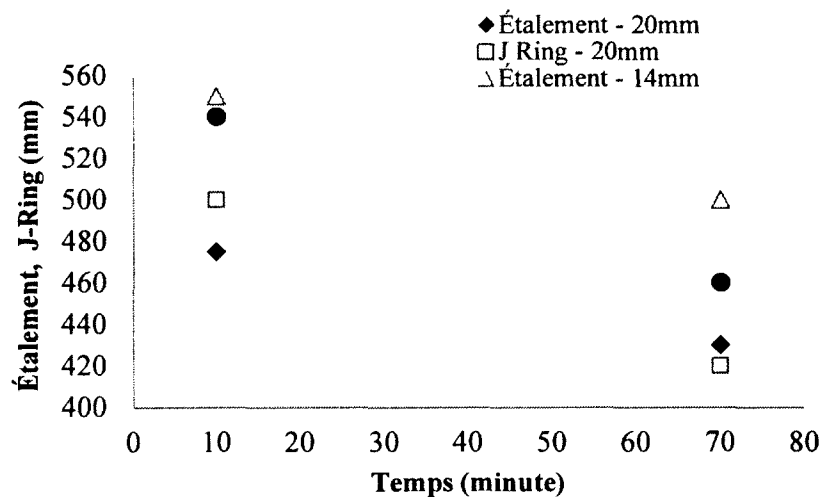


Figure 4.1 Perte d'étalement des BSAP-I à l'usine (simulation du transport - Phase III.1A)

En prenant en compte le besoin de couler le BSAP-I dans les coffrages des piliers de pont en utilisant un système de pompage au chantier, nous avons évalué la fluidité des bétons proposés avant et après pompage pendant l'étape de validation à l'usine (Phase III.1B). La figure 4.2 montre les résultats d'étalement et de J-Ring mesurés dans le temps. On remarque pour les deux BSAP-I ayant un MSA de 20 et 14 mm qu'il existe une perte d'étalement respectivement de 5 et 25 mm

Dans le cas de J-Ring, on observe une diminution presque semblable de 25 et 30 mm. Les écarts obtenus entre l'étalement et le J-Ring avant et après pompage ont été respectivement de 15 et 35 mm pour le BSAP-I avec un MSA de 20 mm et de 5 et 10 mm pour le BSAP-I avec un MSA de 14 mm. Ce BSAP-I peut être considéré comme un béton ne présentant pas de blocage visible, selon la norme ASTM C 1621.

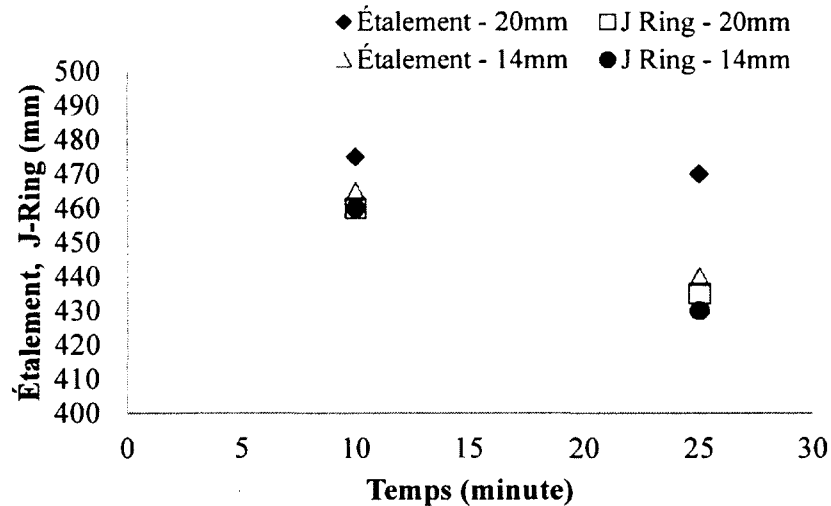


Figure 4.2 Perte d'étalement des BSAP-I à l'usine (après pompage - Phase III.1B)

4.1.2 Capacité de remplissage dans L-box et la boîte de remplissage

Nous avons évalué la capacité de remplissage avant et après 5 secondes de vibration du béton dans la L-Box en utilisant respectivement 1 barre dans la phase de pré-validation III.1A et 2 barres dans la phase de validation III.1B. En plus, nous avons utilisé la boîte transparente pour évaluer cette capacité de remplissage avant et après vibration du BSAP-I dans la phase III.1B. Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 4.1.

En ce qui concerne l'utilisation de la L-Box contenant une barre, après que les deux bétons proposés ont été coulés, un niveau de remplissage près de 100% a été obtenu dans tous les cas. Ceci étant très semblable à ceux obtenus après avoir appliqué la vibration aux bétons. Étant donné qu'un BSAP-I avec un niveau d'étalement de 500 ± 50 mm nécessite de l'application d'une quantité faible d'énergie de consolidation pour améliorer significativement sa facilité de remplissage du coffrage, nous observons que le L-Box contenant 1 barre n'a pas été adéquate pour bien caractériser les deux BSAP-I. Tandis que pour l'utilisation de la L-Box contenant

deux barres, nous avons obtenu des niveaux de remplissage de l'ordre de 32 à 38% avant vibration et de 82 à 100% après vibration aussi le béton ne présente pas de problèmes de blocage à cause de la réduction d'espacement des armatures dans la L-Box. Dans ce dernier cas, l'obtention d'une capacité de remplissage supérieure à 80% dans la L-Box contenant 2 barres, après 5 secondes de vibration est aussi supporté par les résultats illustrés dans la figure 2.18 du projet de BSAP pour le bâtiment. Les taux de remplissage sont aussi très semblables à ceux obtenus pour un BSAP nécessitant une vibration minimale afin de maximiser sa facilité de remplissage dans le coffrage. Nous présentons dans la figure 4.3 les résultats comparatifs sur la capacité de remplissage avant et après vibration dans la boîte L-Box et la boîte de remplissage (Phase III.1B). Dans le cas du L-Box, on remarque des capacités de remplissages très semblables avant vibration comprises entre 32,8 et 38,5 %. Après vibration, tous les BSAP-I ont développé des valeurs supérieures à 80%, étant la valeur minimale requise pour un BAP. Ces résultats démontrent que l'application d'une énergie minimale au béton confère une augmentation significative de cette capacité de remplissage d'au moins 50% pour améliorer la facilité de mise en place des BSAP-I. Dans le cas de la boîte transparente, on remarque des capacités de remplissages très semblables comprises entre 42,5 et 44,3%. Après 5 secondes de vibration, il existe une augmentation de la capacité d'au moins 40% permettant développer des niveaux supérieurs à 75% est enregistré.

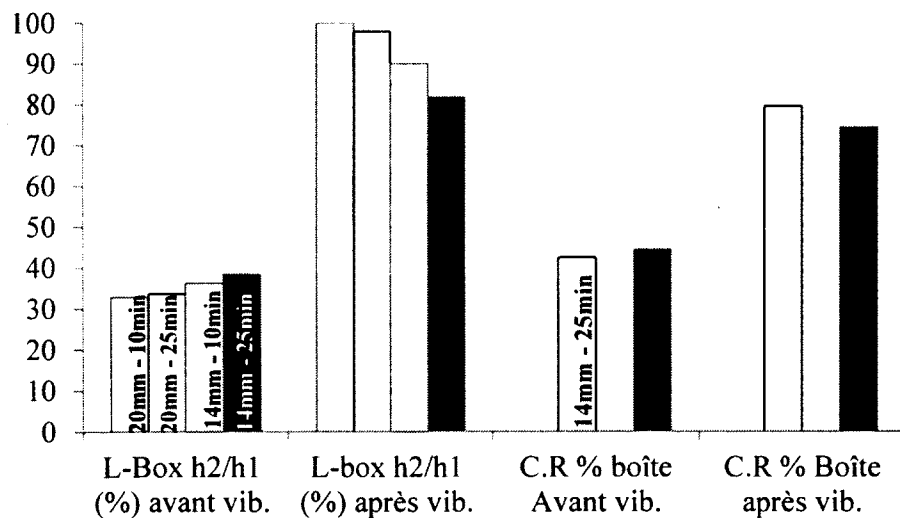


Figure 4.3 Capacité de remplissage dans le L- Box et la Boîte transparente (avant et après pompage - Phase III.1B)

Nous avons davantage mesuré le temps d'écoulement T_{400} dans la boîte L-Box. Les résultats présentés dans le tableau 4.1 montrent des valeurs très semblables comprises entre 2 et 7 secondes avant et après pompage pour le BSAP-I avec un MSA de 14 mm. Ces valeurs confirment l'uniformité de la viscosité plastique dans le temps.

4.1.3 Viscosité plastique – Seuil d'écoulement

Nous avons évalué le comportement rhéologique des deux BSAP-I en mesurant la viscosité η et le seuil τ_0 pendant l'étape de pré-validation PIII.1A. À partir des résultats présentés dans le tableau 4.1, on remarque dans tous les cas l'existence des faibles viscosités, celles-ci pouvant être associées à la teneur en air entraîné fluctuant de 6 à 7%. Ces viscosités peuvent augmenter le risque de ségrégation des bétons, néanmoins il existe des seuils τ_0 suffisants entre 98,6 et 538 Pa qui ont conféré une stabilité statique adéquate aux BSAP, tel que nous allons présenter dans la section 4.1.4. Dans le cas du seuil τ_0 , nous présentons dans la figure 4.4 la relation existante entre ce paramètre et l'étalement mesuré. On observe pour le BSAP-I ayant un MSA de 20 mm qu'il possède un étalement situé dans la bande inférieure requise (450 - 500 mm) et une forte augmentation du seuil τ_0 dans le temps. Ceci peut occasionner une demande d'énergie de consolidation important, tandis que pour le BSAP-I ayant un MSA de 14 mm, il possède un étalement situé dans la bande supérieure visée et un seuil τ_0 adéquat pour sa mise en place au chantier.

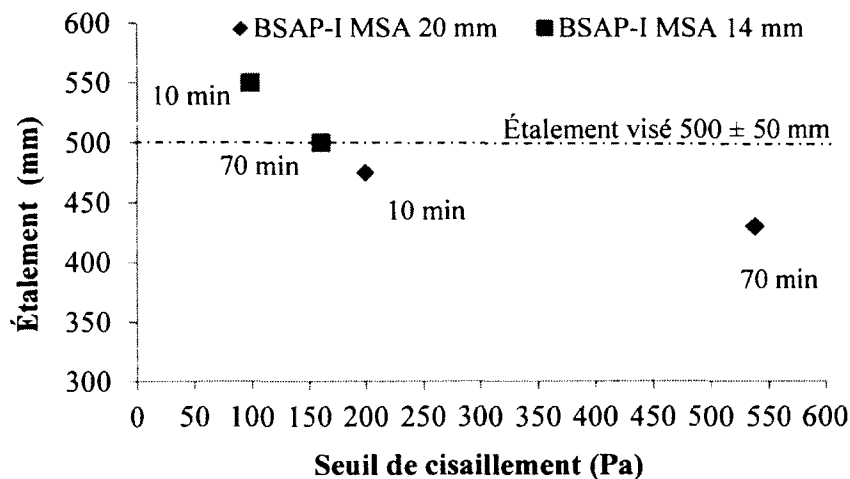


Figure 4.4 Étalement – seuil de cisaillement des BSAP-I (10 et 70 min - Phase III.1A)

4.1.4 Ségrégation statique

Nous présentons dans le tableau 4.3 les résultats de ségrégation statique des BSAP-I avec la colonne de ségrégation ainsi que les limites acceptables. On remarque que le BSAP-I avec un MSA de 14 mm présente des indices de ségrégation et des coefficients de variation respectivement de 15% et 3%. Ces valeurs sont inférieures aux seuils maximaux établis pour la conception d'un BAP au niveau de stabilité statique [Hwang et coll., 2006]. Dans le cas du BSAP-I ayant un MSA de 20 mm, ce béton possède des indices de ségrégations élevées et des coefficients de ségrégation au dessus du seuil de 3%.

TABLEAU 4.3 RÉSULTATS DE SÉGRÉGATION STATIQUE MESURÉE AVEC LA COLONNE DE SÉGRÉGATION

	MSA – 20 mm		MSA – 14 mm		Limite acceptable
	Phase III.1A	Phase III.1B	Phase III.1A	Phase III.1B	
Indice de ségrégation %	20,61	22,41	14,83	4,92	15,0 [Hwang et coll., 2006]
Coefficient de variation (COV)	2,51	6,24	2,17	1,50	3,0 [Hwang et coll., 2006]

4.1.5 Pression latérale exercée sur le coffrage

Dans le cas de la pression latérale mesurée à l'échelle de laboratoire pendant la phase de validation III.1B, les diagrammes de distribution de la pression latérale dans le temps pour le BSAP-I ayant un MSA de 14mm et celui de la distribution de pression latérale en fonction de la profondeur de mise en place sont présentés dans les figures 4.5 et 4.6. Dans le premier cas, on remarque une diminution de la pression dans le temps au fond de la colonne, ceci étant très faible 550 minutes après la mise en place du BSAP-I. Dans le deuxième cas, on remarque une pression maximale tout de suite au coulage du BSAP-I équivalent à 160 KPa. Ceci représente 70% de la pression maximale hydrostatique. À cause des problèmes techniques il n'a pas été possible de faire cet essai pour le BSAP-I de 20 mm.

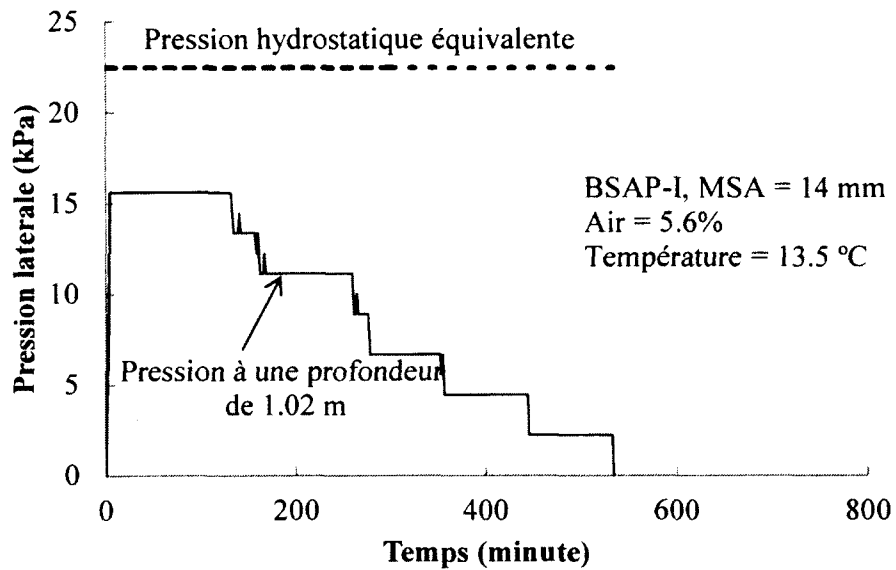


Figure 4.5 Évolution de la pression latérale du BSAP-I sur la colonne PVC de 1100 mm de hauteur et 200 mm de diamètre (Phase III.1B)

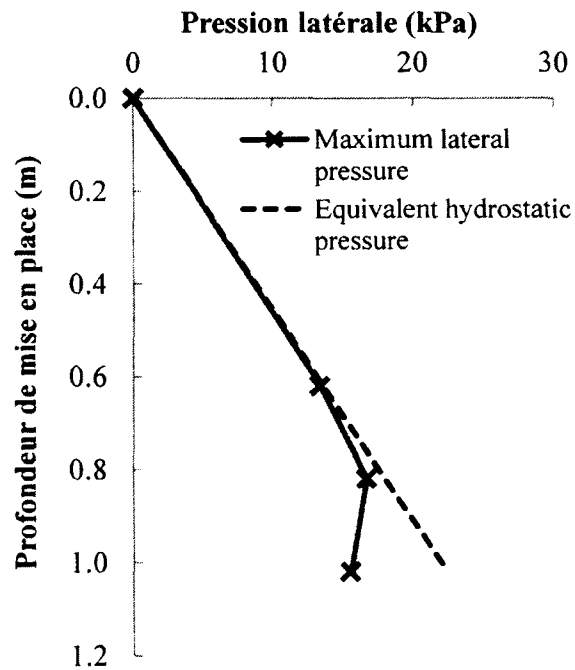


Figure 4.6 Distribution de la pression latérale du BSAP-I sur la colonne PVC de 1100mm de hauteur et 200 mm en diamètre (Phase III.1B)

4.1.6 Thixotropie au repos

Nous présentons dans la figure 4.7 l'évolution des seuils de cisaillement statiques mesurés à 15, 30, 45 et 60 minutes pour les deux BSAP-I validés à l'usine. On remarque que le BSAP-I ayant un MSA de 14 mm possède un niveau de structuration dans le temps plus important par rapport à celui de 20 mm. Des seuils τ_0 au repos de 474 et 517 Pa à 15 minutes et des taux d'augmentation du seuil de 3,9 et 6,7 Pa/minute ont été obtenus respectivement pour le BSAP-I avec un MSA de 20 et 14 mm.

En prenant en compte l'échelle de classement des indices de restructuration établie par [Omran, 2011] au tableau 3.9 (Seuil : 200 – 550 Pa et taux d'augmentation de 0 à 25 Pa/minute) nous pouvons classer ces deux bétons ayant un faible indice de thixotropie. En plus, à partir des résultats de seuil τ_0 au repos présentés, des indices de thixotropie de 2269 et 4646 Pa.Pa/min ont été calculés pour les BSAP-I ayant respectivement un MSA de 20 et 14 mm.

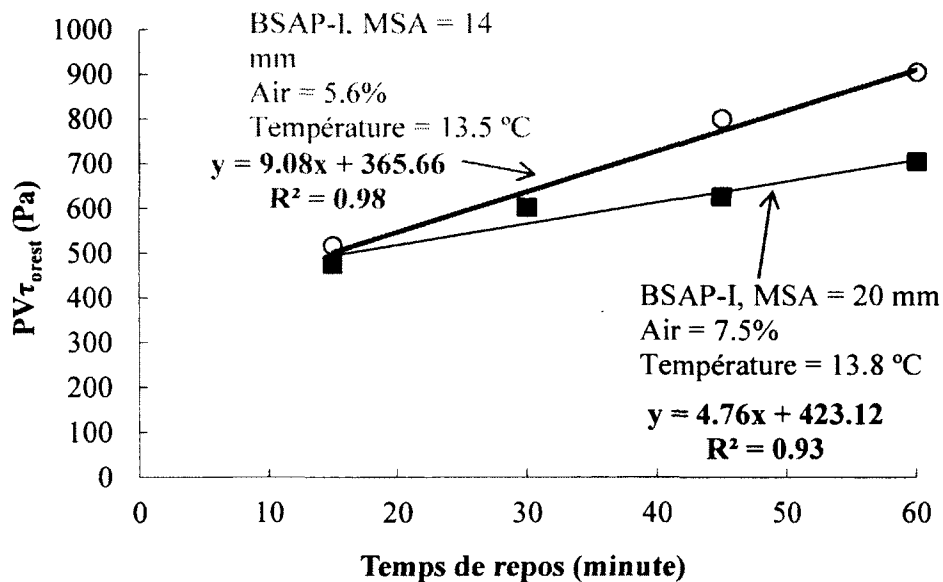


Figure 4.7 Comportement thixotropique au repos (après pompage - Phase III.1B)

4.1.7 Résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression des cylindres fabriqués avec différents nombre de pilonnages sont présentés dans le tableau 4.2 et illustrés dans la figure 4.8. En plus, afin d'évaluer la fiabilité de la méthode d'échantillonnage des cylindres utilisée, nous avons calculé la dispersion $d_{2s\%}$ par rapport à la moyenne de 3 cylindres pour chaque mélange de béton suivant la norme ASTM C 39. Pour les valeurs de résistances obtenues, on remarque que tous les résultats à 28 jours accomplissent la résistance à la compression de 35 MPa spécifié par le projet d'infrastructure de pont. Dans l'étape de pré-validation PIII.1A, pour le BSAP-I ayant un MSA de 20 mm, des résistances très semblables avec 5 et 8 coups/1 couche ont été obtenus à l'âge de 28 jours (moyenne de 50,6 MPa) et 56 jours (Moyenne de 54,8 MPa), tandis que pour le BSAP-I ayant un MSA de 14 mm, des résistances très semblables avec 5 et 8 coups/1 couche ont été obtenues à l'âge de 28 jours (Moyenne 52,2 MPa) et 56 jours (Moyenne 56,3 MPa). Ces résistances sont 3% plus élevées que celles du BSAP-I avec MSA 20 mm à l'âge de 28 et 56 jours. Dans l'étape de pré-validation PIII.1B, le BSAP-I ayant un MSA de 14 mm montre une meilleure performance au niveau de résistance en compression de 10% plus haut par rapport à la résistance à la compression obtenue avec le BSAP-I contenant un MSA de 20 mm à 28 et 56 jours.

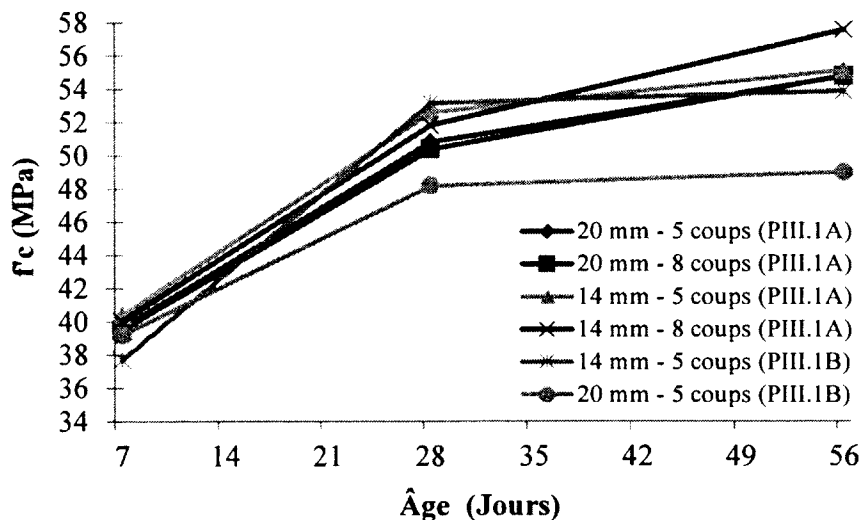


Figure 4.8 Résultats de résistance en compression des cylindres de BSAP avec différents nombre de pilonnage (Phase III.1A et Phase III.1B)

En ce qui concerne la dispersion $d_{2s}\%$ calculée pour les cylindres de BSAP-I, on remarque que tous les résultats obtenus à 28 et 56 jours ne dépassent pas la limite maximale de 10.6% établie par la norme ASTM C39 (figure 4.9). À 7 jours, certaines valeurs dépassent cette valeur limite. Néanmoins, lorsque le gain de résistance augmente dans le temps, il existe une réduction significative de cette dispersion à l'âge de 28 et 56 jours.

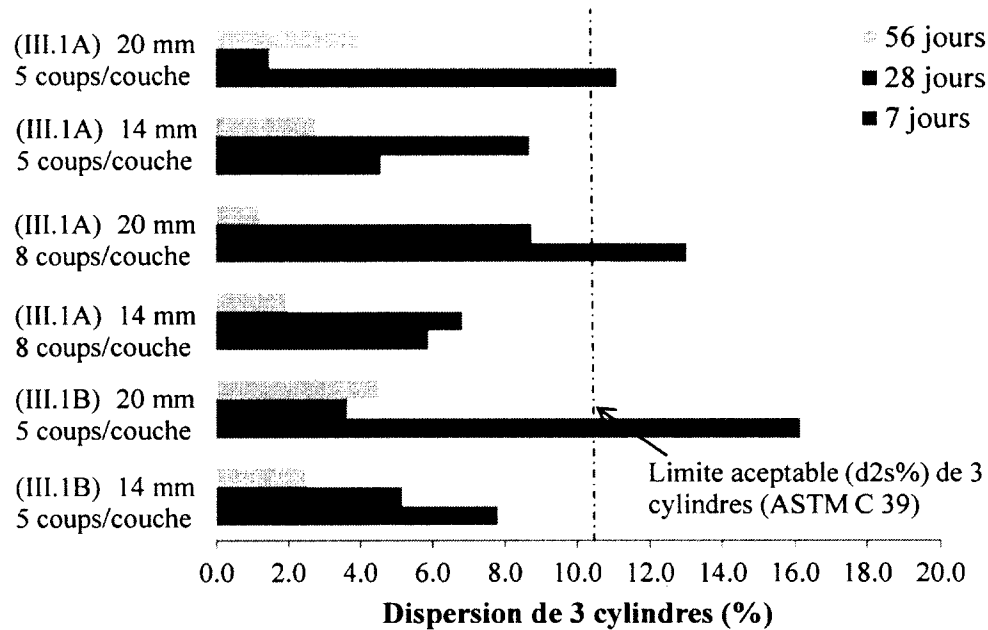


Figure 4.9 Résultats de dispersion $d_{2s}\%$ des cylindres pour chaque mélange de BSAP avec différents nombre de pilonnages (Phase III.1A et Phase III.1B)

4.1.8 Module d'élasticité

Les résultats de module d'élasticité des deux BSAP-I validés à l'usine sont présentés dans la figure 4.10. Ces valeurs sont très semblables à l'âge de 28 jours. À partir des résultats du module d'élasticité et des résistances en compressions obtenues pour ces deux bétons, nous avons trouvé une bonne corrélation en utilisant l'équation 4.1 du code Européen 90-95 pour prédire le module d'élasticité du béton.

$$EC = 9 (f_c)^{1/3} \quad (4.1)$$

Dont EC est le module d'élasticité et f_c est la résistance à la compression du béton. Les résultats comparatifs pour chaque BSAP-I sont présentés aussi dans la figure 4.10.

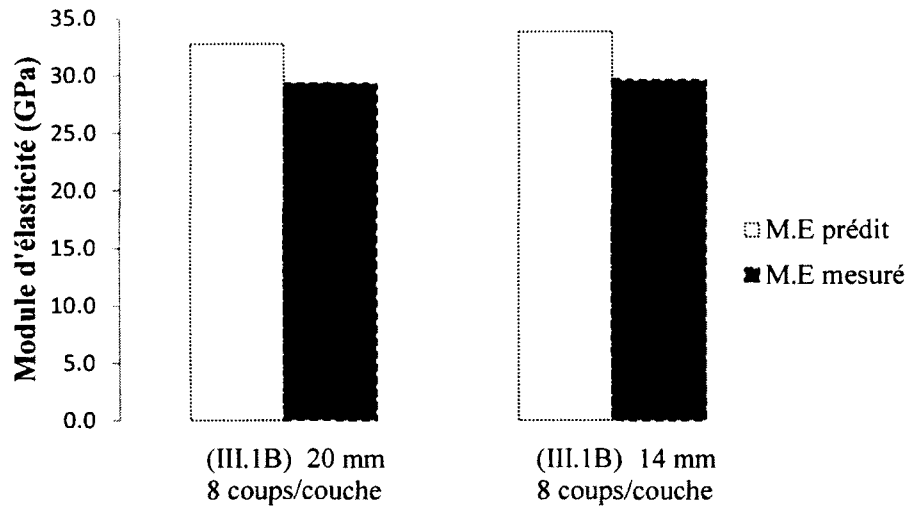


Figure 4.10 Résultats prédits et mesurés du module d'élasticité des BSAP (PIII.1B)

4.1.9 Perméabilité aux ions chlores

Nous présentons dans la figure 4.11 les résultats des perméabilités aux ions chlores pour les deux BSAP-I validés. À partir de charges électriques obtenues pour les cylindres pilonnés 8 coups/1 couche, on remarque que les deux BSAP-I possèdent un niveau très semblable de charge électrique, ceci étant qualifié par la norme ASTM C1202 (tableau 3.13) comme des bétons possédant un niveau de pénétrabilité très négligeable.

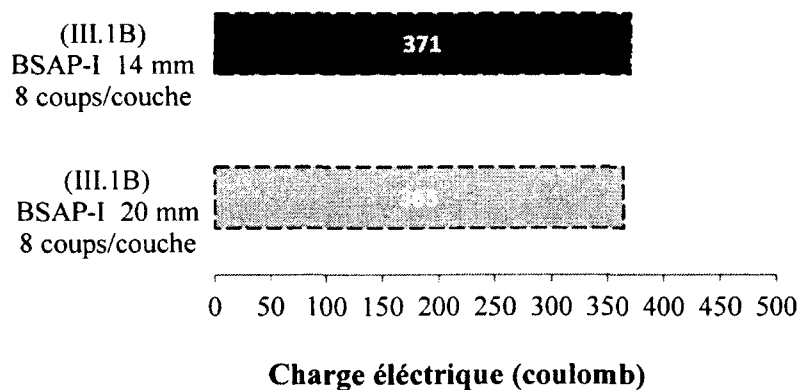


Figure 4.11 Résultats de perméabilité aux ions chlore pour les BSAP-I (PIII.1B)

4.1.10 Mesure de l'espacement des bulles d'air entraîné

Les résultats des indices d'espacement sont consignés dans le tableau 4.2B. On remarque des valeurs très semblables pour les échantillons prélevés avant et après pompage dans l'étape de validation (phase III.1B). Ces valeurs sont respectivement 170 et 190 μm dans le cas du BSAP-I ayant un MSA de 14 mm et de 180 et 160 μm dans le cas du BSAP-I ayant un MSA de 20 mm. Ces indices accomplissent dans tous les cas la limite de 230 μm demandée par le devis technique indiqué au tableau 2.3

4.1.11 Résistance au gel/dégel

Les résultats de résistance aux cycles de gel/dégel pour les échantillons fabriqués avant et après pompage sont présentés au tableau 4.2B. Dans tous les cas, les deux BSAP-I ont montré des bonnes durabilités face des cycles de gel/dégel. Les facteurs de durabilité (F.D.) de ces deux bétons obtenus sont largement supérieurs à 60%, le minimum recommandé par la norme ASTM C 666.

4.1.12 Résistance à l'écaillage

À partir des résultats présentés dans le tableau 4.2B, on remarque que les pertes de masse après 56 cycles de gel/dégel obtenues sur les échantillons exposés à l'écaillage fluctuent entre 200 et 300 g/m^2 pour le BSAP-I avec un MSA de 14 mm et entre 110 et 300 g/m^2 pour le BSAP-I avec un MSA de 20 mm. Elles sont dans tous les cas inférieures à la limite maximale de 500 g/m^2 spécifiée par la norme BNQ 2621-900 après 56 cycles d'exposition.

4.2 Choix du BSAP-I optimal pour la coulée des piliers de pont

Nous présentons au tableau 4.4 une récapitulation des points positifs obtenus par chaque propriété mesurée à l'état frais et durci, en prenant en compte l'accomplissement des devis techniques, des limites établis par les normes ASTM et des performances conférés par chaque essai. À partir des résultats obtenus à l'état frais et durci, nous pouvons tirer les conclusions suivants:

- ✓ Le BASP-I ayant un MSA de 14 mm a démontré une meilleure performance à l'état frais et durci (moyenne 94,5%) que celui de 20 mm pour la mise en place des piliers de pont.

- ✓ À l'état frais, un équilibre optimal entre la fluidité et la stabilité, ainsi qu'un meilleur comportement thixotropique a été conféré par le BSAP-I ayant un MSA de 14 mm. À l'état durci, des résistances à la compression très semblables et fiables ont été obtenus pour les deux BSAP-I sur des cylindres confectionnés avec des niveaux de pilonnage respectivement de 5 et 8 coups / couche.
- ✓ La méthode adaptée pour l'essai de L-Box avec 2 barres et une vibration de 5 secondes a permis de bien caractériser la capacité de remplissage des BSAP-I validés.
- ✓ Les deux BSAP-I validés ont conféré une très bonne performance aux attaques de gel/dégel, écaillage et pénétration aux ions chlorures.

TABLEAU 4.4 RÉCAPITULATION DES EFFETS DE CHAQUE PROPRIÉTÉ MESURÉE À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI DES BSAP-I (PHASE III.1A ET B)

	BSAP-I 14 mm		BSAP-I 20 mm	
	PIII.1A	PIII.1B	PIII.1A	PIII.1B
Étalement	+	+	-	+
Perte d'étalement	+	-	+	+
J-Ring	+	+	+	+
Perte de J-Ring	+	-	-	-
E - J	+	+	+	+
T ₄₀	+	+	+	+
T ₄₀₀		+		-
h ₂ /h ₁ L-Box	+	+	+	+
C.R Boîte transparente		+		-
Seuil de cisaillement	+		-	
Viscosité plastique	+		-	
Ségrégation statique	+	+	-	-
Pression latérale		+		
Thixotropie au repos		+		-
Résistance en compression	+	+	+	+
Module d'élasticité		+		+
Indice des vides		+		+
Gel / dégel		+		+
Écaillage		+		+
Perméabilité aux ions chlore		+		+
Total	100%	89%	55%	71%

4.3 Phase III.1C Caractérisation et instrumentation du BSAP-I au chantier

Dans cette étape, nous avons réalisé au chantier l'instrumentation du BSAP-I pendant sa mise en place afin de mesurer la pression exercée par ce type de béton sur le coffrage d'un pilier de pont. Nous avons aussi vérifié certaines propriétés du BSAP-I choisi (MSA 14 mm) à l'état frais et durci. Ces résultats sont présentés en détail et discutés dans la section 4.3.1.

4.3.1 Présentation et discussion des résultats

Les propriétés à l'état frais et durci du BSAP-I choisi avec un MSA de 14 mm sont consignées au tableau 4.5. L'évolution du comportement thixotropique au repos de ce béton et le diagramme de distribution de pression sur la profondeur du pilier de pont sont présentés respectivement dans les figures 4.12 et 4.13.

À l'état frais, un niveau d'étalement égal à la limite supérieure du devis technique (550 mm – tableau 2.3) a été obtenu. En plus, un écart entre la valeur de l'étalement et celle de J-Ring a été de 10 mm. Ce résultat permet de qualifier le BSAP-I comme un béton ne présentant pas de blocage visible, tel qu'établie dans la norme ASTM C 1621. Finalement, un indice de ségrégation statique plus faible (7,8%) par rapport aux indices trouvés dans les étapes précédentes a été obtenu dans le cas du BSAP-I.

À l'état durci, des résistances à la compression très semblables et acceptables à 7 et 28 jours ont été obtenues. Cependant, à l'âge de 56 jours il existe une diminution de la résistance par rapport à celles trouvées dans les étapes précédentes. On remarque dans ce dernier cas l'existence d'une dispersion de 10,7% pour les 3 cylindres testés (50, 45 et 48 MPa) faisant partie du résultat de 48 MPa à 56 jours. En prenant en compte l'ensemble des résultats f_c obtenus dans les étapes de pré-validation et validation à l'usine, nous pouvons enlever la valeur de résistance à la compression individuelle la plus dispersée (45 MPa) qui ne fait pas partie du comportement du BSAP-I et nous avons alors une résistance à la compression de 49 MPa, ceci étant plus semblable à celle obtenue dans l'étape de validation à l'usine.

TABLEAU 4.5 RÉSULTATS DE PROPRIÉTÉS FRAIS DU BSAP-I AVEC MSA
14 mm AU CHANTIER (Phase III.1C)

		MSA 14 mm Après pompage
Température du béton (°C)		14,2
Étalement	(mm)	550
T ₄₀	(sec)	1,1
VSI		0
J-Ring (8 barres)	(mm)	560
E-J	(mm)	0
Masse volumique	(kg/m ³)	2264
Ségrégation statique	(%)	7,84
COV	(%)	2,81
Résistance à la compression (MPa)	7 jours	38
	28 jours	47
	56 jours	49
Thixotropie au repos (Pa)	15 min	388
	30 min	602
	45 min	771
	60 min	1106

Les résultats des seuils τ_0 au repos obtenus au chantier pour le BSAP-I ayant un MSA de 14 mm sont présentés dans la figure 4.12. À titre comparatif, nous présentons les résultats des seuils obtenus dans l'étape de validation à l'usine. On remarque que le BSAP-I testé au chantier possède un seuil τ_0 au repos légèrement inférieur à 15 minutes (388 Pa) mais un taux d'augmentation du seuil dans le temps de 12 Pa / minute et un indice de thixotropie de 6008 Pa. Pa / min. Ces valeurs sont plus importantes que les valeurs obtenus dans l'étape de validation, ce qui permet de classer comme béton ayant un indice de thixotropie moyen.

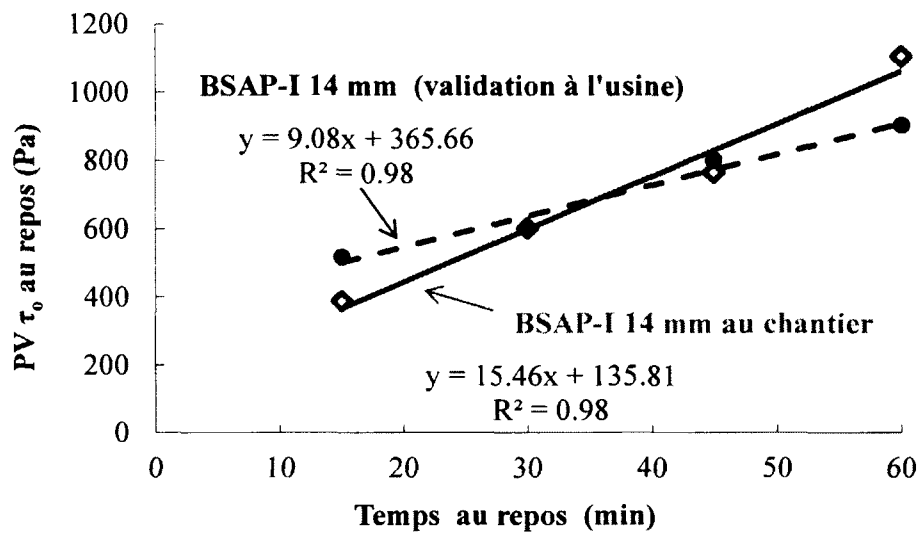


Figure 4.12 Comportement thixotropique du BSAP-I avec MSA de 14 mm au chantier

En ce qui concerne les résultats de pression latérale mesurés au chantier, tel que montré dans la figure 4.13, pour un taux de coulage du BSAP-I de $9,8\text{m}^3 / \text{heure}$, on remarque une pression maximale de 60 KPa. Cette valeur est plus faible en 50% par rapport à la pression hydrostatique et en 29% par rapport à la pression mesurée dans la colonne en PVC.

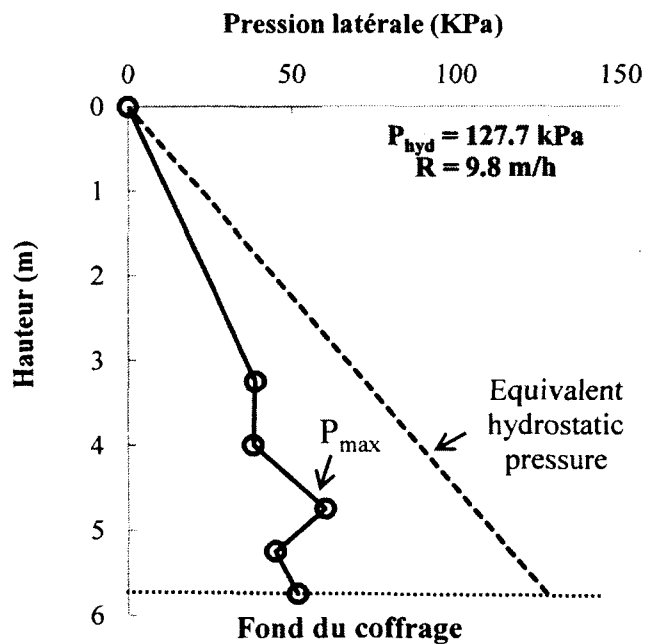


Figure 4.13 Distribution de la pression dans le pilier du pont (Phase III.1C)

4.4 Conclusions

L'objectif général de cette première partie (Phase III.1) vise la mise en œuvre des essais préliminaires pour la caractérisation des BSAP-I à partir des protocoles d'essais et d'échantillonnage trouvés dans le projet de BSAP. Ces essais de caractérisation à l'état frais et durci ont été entrepris pour valider deux BSAP-I, afin de choisir un béton optimal pour la mise en place des piliers d'une infrastructure de pont à Sherbrooke. À cet effet, des propriétés rhéologiques à l'état frais et des propriétés mécaniques à l'état durci ainsi que la durabilité ont été étudiées. À la lumière des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Essais préliminaires de caractérisation des BSAP-I
Les protocoles d'essais et d'échantillonnage du BSAP ont permis de caractériser adéquatement les propriétés rhéologiques à l'état frais et les résistances mécaniques à l'état durci des BSAP-I.
 - Afin de favoriser l'évaluation de la capacité de remplissage d'un BSAP-I, la méthode adaptée pour l'essai L-Box avec 2 barres et un temps de vibration de 5 secondes utilisé ont permis de bien caractériser cette propriété pour BSAP-I ayant un niveau d'étalement entre 500 ± 50 mm.
 - L'application d'un nombre de pilonnage entre 5 et 8 coups/l couche peut être considérée pour l'échantillonnage des éprouvettes. Ceci permettant d'avoir des résultats $f'c$ semblables par rapport à l'application de 10 coups/l couche du BSAP.
- Validation des BSAP-I
 - Les deux BSAP-I validés ont démontré des bonnes performances rhéologiques à l'état frais et des bonnes propriétés mécaniques à l'état durci, étant le BSAP-I avec un MSA de 14 mm le plus optimal. Ces bétons ont conféré une bonne résistance aux attaques de gel/dégel, écaillage et pénétration aux ions chlorés.
- BSAP-I optimal au chantier
 - Le BASP-I ayant un MSA de 14 mm utilisé pour la mise en place des piliers d'une infrastructure de pont a conféré un bon équilibre entre la fluidité/stabilité, ainsi que

des propriétés de thixotropie favorables pour contribuer à la réduction de la pression du béton sur le coffrage d'un pilier instrumenté au chantier.

4.5 Phase III.2A Plan d'expériences

4.5.1 Présentation des résultats

Nous présentons au tableau 4.6 le dosage par m³ de 22 mélanges de BSAP-I faisant partie du plan factoriel et de la partie de validation expliquée dans la section 3.4.2.3. Concernant les résultats obtenus pour les réponses mesurés à 10 et 70 minutes, ils sont respectivement présentés aux tableaux 4.7 et 4.8. Les modèles développés, leur coefficient de corrélation et leur probabilités $> |F|$ sont présentés dans les tableaux 4.9A et 4.9B. Les réponses obtenues à 10 minutes seront principalement modélisés dans cette phase de travail en prenant en compte la nécessité de concevoir un mélange optimal du BSAP-I suite à sa préparation, tandis qu'à 70 minutes nous présenterons quelques modèles à titre illustrative.

4.5.2 Traitement statistique des données

Le traitement statistique des données a été réalisé à l'aide du logiciel Design Expert pour trouver des modèles mathématiques permettant de modéliser les réponses mesurées. Ce logiciel nous donne le coefficient d'influence pour chaque paramètre ainsi que sa probabilité associée. Il est important mentionner que les paramètres d'influence évalués sont déterminés généralement en prenant en compte un intervalle de confiance de 95% ou un risque de 5% de ne pas être significatif ou non influant sur la réponse modélisée. Ce logiciel nous permet aussi de tracer les courbes iso-valeurs pour les réponses choisies. Dans notre cas, pour tracer des courbes nous avons utilisé le logiciel Design Expert en prenant en compte sa grande flexibilité pour tracer quelque soit le type d'équation mathématique obtenue.

En ce qui concerne les coefficients de corrélation R^2 obtenus pour les modèles proposés à 10 minutes de dosage en SP, temps d'écoulement T_{40} et T_{400} , capacité de remplissage après vibration, la viscosité plastique, le seuil de cisaillement, les résistances à 1, 28 et 56 jours sont respectivement de 0,90, 0,86, 0,76, 0,77, 0,90, 0,83, 0,72, 0,83 et 0,81. On remarque que pour la majorité des modèles, les valeurs R^2 obtenus démontrent que les corrélations sont acceptables.

TABLEAU 4.6 DOSAGE DES BSAP-I (PHASE III.2A)

	Code de mélange	Dosage en sec							Teneur en ml/100 kg liant		
		E/L	S/G	Eau (kg/m ³)	Ciment GUb F/SF (kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Granulats 5-14mm (Kg/m ³)	Granulats 5-20mm (Kg/m ³)	P (Eucon DX)	SP (Eucon 37)	AEA (Air extra)
PLAN FACTORIEL	BSAPI-M1	0,40	0,53	171	430	855	551	236	150	1420	265
	BSAPI-M2	0,40	0,47	171	430	759	622	266	150	1300	330
	BSAPI-M3	0,40	0,53	148	370	915	590	253	150	1580	300
	BSAPI-M4	0,40	0,47	148	370	812	665	285	150	1520	340
	BSAPI-M5	0,34	0,53	146	430	889	573	246	150	1880	300
	BSAPI-M6	0,34	0,47	146	430	789	646	277	150	1800	350
	BSAPI-M7	0,34	0,53	126	370	945	609	261	150	2050	300
	BSAPI-M8	0,34	0,47	126	370	839	687	295	240	1660	340
POINTS EN ETOILE	BSAPI-M9	0,42	0,50	168	400	818	599	257	150	1340	295
	BSAPI-M10	0,32	0,50	128	400	867	636	273	150	2250	400
	BSAPI-M11	0,37	0,50	167	450	798	584	250	150	1340	295
	BSAPI-M12	0,37	0,50	130	350	888	650	279	150	2250	380
	BSAPI-M13	0,37	0,55	148	400	935	556	238	150	1620	250
	BSAPI-M14	0,37	0,45	148	400	765	680	291	150	1450	320
CENTRAL	BSAPI-M15	0,37	0,50	148	400	850	618	265	150	1530	265
	BSAPI-M16	0,37	0,50	148	400	850	618	265	150	1530	265
	BSAPI-M17	0,37	0,50	148	400	850	618	265	150	1530	265
	BSAPI-M18	0,37	0,50	148	400	850	618	265	150	1530	265
POINT DE VALIDATION	BSAPI-M19	0,400	0,515	166	415	845	578	248	150	1380	290
	BSAPI-M20	0,385	0,485	166	430	790	609	261	150	1430	275
	BSAPI-M21	0,340	0,515	131	385	905	619	265	150	1860	300
	BSAPI-M22	0,385	0,515	165,5	430	838,43	573,73	245,88	150	1460	280

TABLEAU 4.7 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I À 10 MINUTES (PHASE III.2A)

	Code de mélange	SP (%)	AEA (%)	T. béton (°C)	Étal. E (mm)	J-Ring J (mm)	E-J (mm)	VSI	T ₄₀ (Sec)	Seuil τ_0 (Pa)	Viscosité η (Pa)	Air (%)	Masse vol. (kg/m ³)	L - Box (2 barres)		
														Avant vib.		Après
														h2/h1 (%)	T ₄₀₀ (sec)	h2/h1 (%)
PLAN FACTORIEL	BSAPI-M1	0,49	0,027	21,2	550	545	5	0	2,4	71,7	25,4	7,1	2287	80,8	2,2	100,0
	BSAPI-M2	0,45	0,034	22,2	535	525	10	0	2,6	125,2	11,8	7,2	2254	76,2	2,9	100,0
	BSAPI-M3	0,55	0,030	22,7	525	530	-5	0	4,2	252,1	34,5	7,4	2281	52,4	3,9	93,8
	BSAPI-M4	0,50	0,035	21,2	525	530	-5	0	3,1	150,4	34,5	7,2	2284	56,0	2,7	96,5
	BSAPI-M5	0,65	0,030	22,8	530	520	10	0	4,8	156,0	132,6	6,1	2331	63,6	10,3	94,4
	BSAPI-M6	0,62	0,035	22,8	525	525	0	0	4,3	68,5	76,2	6,6	2299	75,0	5,8	100,0
	BSAPI-M7	0,71	0,030	20,2	520	500	20	1	10,0	178,0	125,6	7,4	2317	50,0	10,5	88,9
	BSAPI-M8	0,58	0,035	21,7	540	530	10	0	7,2	47,0	34,0	7,0	2343	54,6	8,1	92,0
PLAN EN ÉTOILE	BSAPI-M9	0,47	0,030	24,5	525	525	0	0	1,1	192,9	9,5	7,0	2269	40,0	1,1	84,2
	BSAPI-M10	0,67	0,041	23,5	510	500	10	2	18,2	-	-	5,4	2386	18,0	19,0	73,7
	BSAPI-M11	0,47	0,030	24,1	525	525	0	0	2,4	247,2	35,5	7,0	2275	31,3	2,2	94,1
	BSAPI-M12	0,78	0,039	23,2	520	510	10	2	19,9	-	-	5,7	2369	18,4	21,4	77,2
	BSAPI-M13	0,56	0,025	22,1	530	530	0	0	3,1	81,0	57,1	7,4	2271	80,0	3,0	100,0
	BSAPI-M14	0,50	0,033	23,5	525	525	0	0	4,2	307,1	52	6,8	2288	22,5	7,0	79,0
P. CENTRAL	BSAPI-M15	0,53	0,027	21,9	545	540	5	0	3,8	129,0	43,4	6,9	2311	70,0	3,8	94,1
	BSAPI-M16	0,53	0,027	23,0	530	520	10	0	3,3	214,9	27,4	7,2	2285	54,4	3,5	96,5
	BSAPI-M17	0,53	0,027	22,2	535	530	5	1	3,0	89,0	50,1	7,4	2277	75,0	3,1	100,0
	BSAPI-M18	0,53	0,027	21,0	535	530	5	1	3,4	176,3	37,6	7,8	2269	56,0	3,3	98,0
VALIDATION	BSAPI-M19	0,48	0,028	17,6	530	515	15	0	2,6	116,5	22,3	7,1	2286	67,0	3,1	96,0
	BSAPI-M20	0,50	0,027	18,4	525	520	5	0	2,6	68,9	33,7	7,4	2271	58,6	3,4	88,4
	BSAPI-M21	0,65	0,030	19,0	520	505	15	1	7,6	75,4	85,4	6,8	2300	50,8	13,8	82,5
	BSAPI-M22	0,51	0,028	19,2	530	520	10	1	2,7	181,2	46,1	7,5	2257	56,0	3,7	92,4

TABLEAU 4.8 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I À 70 MINUTES (PHASE III.2A)

	Code de mélange	T. béton (°C)	Étal. E (mm)	J-Ring J (mm)	E-J (mm)	VSI	T ₄₀ (Sec)	Seuil τ ₀ (Pa)	Viscosité μ (Pa)	Air (%)	Masse vol. (kg/m ³)	L - Box (2 barres)			Résistance f _c (MPa)		
												Avant vib.		Après	1 28 56		
												h2/h1 (%)	T ₄₀₀ (sec)	h2/h1 (%)	jour	jours	jours
P. FACTORIEL	BSAPI-M1	21,6	515	500	15	0	2,7	182,8	11,8	7,0	2291	71,4	2,4	100,0	15,0	52,0	54,1
	BSAPI-M2	22,9	480	480	0	0	3,2	178,2	12,4	6,9	2269	52,4	3,6	94,4	14,5	53,5	54,3
	BSAPI-M3	23,4	480	480	0	0	8,6	320,6	35,7	5,0	2343	23,5	7,9	88,9	17,0	53,5	56,6
	BSAPI-M4	21,5	500	505	-5	0	3,9	97,5	37,8	5,0	2351	52,4	3,8	100,0	14,7	54,4	57,8
	BSAPI-M5	23,1	500	495	5	0	9,9	116,7	152,6	5,0	2383	61,9	11,8	94,4	10,8	58,9	62,8
	BSAPI-M6	22,9	505	500	5	0	8,4	60,3	68,9	6,0	2330	57,1	8,8	96,5	17,4	57,8	63,5
	BSAPI-M7	20,4	495	475	20	0	12,4	143,6	141,7	5,6	2367	35,7	17,9	84,2	10,3	54,3	60,1
	BSAPI-M8	21,9	505	500	5	0	10,2	68,2	114,0	4,8	2397	53,3	10,5	94,1	3,5	54,0	56,9
P. EN ÉTOILE	BSAPI-M9	24,6	470	470	0	0	3,8	268,2	15,3	6,0	2314	33,3	4,1	88,9	14,5	51,4	53,1
	BSAPI-M10	23,8	450	430	20	1	20,9	-	-	3,9	2429	15,4	20,8	62,0	10,0	52,4	58,0
	BSAPI-M11	24,2	475	480	-5	0	2,6	219,4	23,3	6,1	2316	29,4	2,9	90,9	13,5	50,9	53,4
	BSAPI-M12	23,6	460	440	20	1	21,1	-	-	3,8	2471	15,0	21,9	57,1	1,6	51,0	53,0
	BSAPI-M13	22,6	510	505	5	0	3,6	64,9	72,5	6,8	2318	62,5	3,9	96,5	13,9	50,7	55,7
	BSAPI-M14	23,6	425	420	5	1	10,6	335,4	71,6	5,5	2351	6,7	13,9	33,3	17,1	53,9	54,6
P. CENTRAL	BSAPI-M15	21,8	500	500	0	0	5,1	357,7	45,1	6,6	2346	45,5	5,9	90,0	15,3	53,5	57,1
	BSAPI-M16	23,5	480	470	10	0	4,1	196,5	44	6,5	2328	70,0	4,4	95,3	17,7	52,8	55,5
	BSAPI-M17	22,7	475	470	5	0	3,9	162,7	48,3	7,0	2296	75,0	4,4	99,4	16,0	55,1	57,1
	BSAPI-M18	21,5	480	450	30	0	4,3	220,3	58,2	5,7	2317	36,5	6,9	91,1	16,1	55,1	61,7
VALIDATION	BSAPI-M19	17,6	510	500	10	0	6,1	187,5	28,2	6,6	2315	55,0	7,2	96,0	15,5	50,5	52,2
	BSAPI-M20	18,4	515	515	0	0	5,5	127,4	33,7	7,0	2302	45,8	5,8	88,4	16,4	50,2	53,2
	BSAPI-M21	19,0	490	470	20	1	12,1	255,4	85,4	5,5	2296	38,2	13,8	82,5	12,2	52,5	55,0
	BSAPI-M22	19,2	520	505	15	1	4,4	101,4	46,1	6,9	2317	48,4	4,9	92,4	15,8	50,8	52,9

TABLEAU 4.9A MODÈLES STATISTIQUES OBTENUS A L'ÉTAT FRAIS (PHASE III.2A)

Paramètre	1 / Dosage en SP R ² = 0,90		1 / T ₄₀ (10 min) R ² = 0,86		1/sqrt T ₄₀₀ (10 min) R ² = 0,76		T ₄₀₀ (70 min) R ² = 0,84		Viscosité η (10 min) R ² = 0,90		Viscosité η (70 min) R ² = 0,72		h ₂ / h ₁ après vib. (10min) R ² = 0,77		1/ Seuil τ ₀ (10min) R ² = 0,83	
	MS	Prob> F	MS	Prob> F	MS	Prob> F	MS	Prob> F	MS	Prob> F	MS	Prob> F	MS	Prob> F	MS	Prob> F
Centre	1,81	-	0,27	-	0,5	-	7,36	-	52,76	-	60,74	-	96,18	-	0,009	N.S
E/L	0,21	0,00	0,09	0,00	0,12	0,00	-3,92	0,01	-32,77	0,00	-46,48	0,00	1,86	0,033	-0,002	0,093
Liant	0,07	0,07	0,06	0,00	N.S	N.S	-1,68	0,00	N.S	N.S	N.S	N.S	2,92	0,004	N.S	N.S
S/G	-0,08	0,03	N.S	N.S	N.S	N.S	1,66	0,07	20,20	0,01	13,25	0,09	-1,42	0,085	-0,003	0,039
E/LxLiant	0,07	0,08	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	-10,13	0,11	N.S	N.S	N.S	N.S	-0,002	0,068
E/LxS/G	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	-16,8	0,02	-14,77	0,07	N.S	N.S	-0,003	0,017
Liant x S/G	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	-1,22	0,168	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	-0,002	0,082

N.S = Non significatif

TABLEAU 4.9B MODÈLES STATISTIQUES OBTENUS A L'ÉTAT DURCI (PHASE III.2A)

Paramètre	Sqrt f _c 1 jour (MPa) R ² = 0,72		f _c 28 jours (MPa) R ² = 0,83		Logit f _c 56 jours (MPa) R ² = 0,81	
	MS	Prob.> F	MS	Prob.> F	MS	Prob.> F
Centre	3,69		54,57		-0,27	
E/L	0,39	0,04	-1,45	0,003	-1,19	0,0010
Liant	0,26	0,13	0,75	0,059	-0,95	0,004
S/G	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S
E/LxLiant	-0,33	0,07	-1,35	0,004	N.S	N.S
E/LxS/G	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S
Liant x S/G	-0,31	0,09	N.S	N.S	N.S	N.S

4.5.3 Modèles statistiques

Les résultats du traitement statistique des données expérimentales sont présentés dans les tableaux 4.9A et 4.9B, en exprimant pour chaque réponse à l'état frais et durci sa variation (MS) en fonction des facteurs influents et sa probabilité associée. Étant donné que chaque paramètre est affecté d'un coefficient d'influence et d'une probabilité de signification, il faut préciser dans le premier cas que le signe moins (-) signifie que le paramètre a un effet négatif sur la réponse étudiée (ce qui veut dire par exemple qu'une augmentation de la valeur de ce paramètre occasionne une diminution de la réponse). Par contre, le signe plus (+) signifie que la réponse a un effet proportionnel à la variation du paramètre associé. Dans le deuxième cas concernant la probabilité de signification, ceci représente le risque de considérer qu'un paramètre est influent, tandis qu'il ne l'est pas. Le coefficient R^2 est une valeur de corrélation important, ceci étant optimal lorsqu'il est très proche de 1. Si un coefficient est affecté d'un risque supérieur à 5%, il est considéré comme un paramètre non significatif.

À partir des résultats montrés dans les tableaux 4.8A et 4.8B, nous présentons les modèles mathématiques trouvés à 10 minutes faisant partie de l'utilisation du plan d'expériences pour la conception du BSAP-I. Nous présentons aussi quelques modèles trouvés pour les propriétés mesurés à 70 minutes.

Equations mathématiques des modèles trouvés

$$1/\text{Dosage en SP (\%)} = 1,81 + 0,21 \text{ E/L} + 0,07 \text{ Liant} - 0,08 \text{ S/G} + 0,07 \text{ E/L x Liant}$$

$$1/T_{40} \text{ 10 min} = 0,27 + 0,085 \text{ E/L} + 0,055 \text{ Liant}$$

$$1/\sqrt{T_{400}} \text{ 10 min} = 0,50 + 0,12 \text{ E/L}$$

$$T_{400} \text{ 70 min (sec)} = 7,36 - 3,90 \text{ E/L} - 1,7 \text{ Liant} + 1,66 \text{ S/G} - 1,22 \text{ Liant x S/G}$$

$$\eta \text{ 10 min (Pa.s)} = 52,76 - 32,77 \text{ E/L} + 20,20 \text{ S/G} - 10,13 \text{ E/L x Liant} - 16,80 \text{ E/L x S/G}$$

$$\eta \text{ 70 min (Pa.s)} = 60,74 - 46,68 \text{ E/L} + 13,25 \text{ S/G} - 14,77 \text{ E/L x S/G}$$

$$h_2/h_1 \text{ Après V. 10 min} = 96,18 + 1,86 \text{ E/L} + 2,92 \text{ Liant} - 1,42 \text{ S/G}$$

$$1/(\text{Seuil } \tau_0) \text{ 10 min} = (9,1 - 2 \text{ E/L} + 2,66 \text{ S/G} + 2,25 \text{ E/L x Liant} + 3,29 \text{ E/L x S/G} + 2,11 \text{ Liant x S/G}) / 1000$$

$$\sqrt{f^c} \text{ 1 jour (MPa)} = 3,69 + 0,39 \text{ E/L} + 0,26 \text{ Liant} - 0,33 \text{ E/L x Liant} - 0,31 \text{ S/G}$$

$$f'c \text{ 28 jours (MPa)} = 54,57 - 1,45 \text{ E/L} + 0,75 \text{ Liant} - 1,35 \text{ E/L} \times \text{Liant}$$

$$\text{Ln} [(f'c \text{ 56 jours} - 53,1) / (64,5 - f'c \text{ 56 jours})] \text{ (MPa)} = -0,27 - 1,19 \text{ E/L} - 0,95 \text{ E/L} \times \text{Liant}$$

4.5.4 Fiabilité des résultats

Nous présentons dans le tableau 4.10 les valeurs de l'écart type, le coefficient de variation (COV), l'erreur standard et l'erreur estimée à 95% de niveau de confiance pour toutes les réponses mesurées des quatre mélanges faisant partie du centre de domaine expérimental (M15 à M18). Ceux-ci sont le dosage en SP (%), les propriétés à l'état frais de capacité de remplissage après vibration (h_2/h_1), les temps d'écoulement T_{40} et T_{400} , la Viscosité η , le seuil τ_0 et les résistances à la compression à 1, 28 et 56 jours. En ce qui concerne l'erreur estimée à 95% de confiance pour les réponses mesurées indiquée ci-dessus ont respectivement été de 0%, $\pm 2,93\%$, $\pm 0,39$ secondes, $\pm 0,35$ secondes, $\pm 11,52$ Pa.s, $\pm 64,61$ Pa, $\pm 1,19$ MPa, $\pm 1,37$ MPa et $\pm 3,15$ MPa. Concernant l'erreur relative à 95% de confiance pour les réponses de dosage en SP, le h_2/h_1 après vibration, le T_{40} et le T_{400} , la résistance $f'c$ à 1, 28 et 56 jours sont entre 0 et 10% étant la valeur e 10% la limite acceptable pour la prédiction des propriétés à partir des équations associées. Dans le cas de la viscosité η et le seuil τ_0 , l'erreur relative sont respectivement été de 29% et 42%.

TABLEAU 4.10 FIABILITÉ DES RÉPONSES MESURÉES (PHASE III.2A)

	Dosage SP (%)	T_{40} 10min (sec)	T_{400} 10 min (sec)	η 10min (Pa.s)	τ_0 10min (Pa)	h_2/h_1 après vib. (%)	$f'c$ 1 jour (Mpa)	$f'c$ 28 jours (Mpa)	$f'c$ 56 jours (Mpa)
Moyenne (n = 4)	0,53	3,4	3,4	39,5	152,3	97,1	16	54	58
Écart type	0	0,3	0,3	9,8	54,9	2,5	1,01	1,2	2,7
COV (%)	0	9,9	8,8	24,8	36,0	2,6	6,23	2,2	4,6
Erreur standard	0	0,2	0,2	4,9	27,4	1,2	0,51	0,58	1,3
Erreur estimée (95% confiance)	0	0,4	0,4	11,5	64,6	2,9	1,19	1,4	3,2
Erreur relative	0	11,6	10,3	29,1	42,4	3,0	7,3	2,5	0,05

4.5.5 Validation des modèles statistiques

Afin de préciser la fiabilité des modèles statistiques proposés, nous avons comparé les valeurs prédites avec les valeurs mesurées sur les mélanges préparés au centre du domaine expérimental (M15 à M18) et pour quatre autres mélanges préparés (M19 à M22). Les résultats des valeurs prédites et mesurées sont présentes dans les figures 4.14 à 4.20 pour les réponses de dosage en SP (%) et les propriétés à l'état frais de capacité de remplissage après vibration (h_2/h_1), les temps d'écoulement T_{40} et T_{400} , la Viscosité η , le seuil τ_0 et les résistances à la compression à 1, 28 et 56 jours.

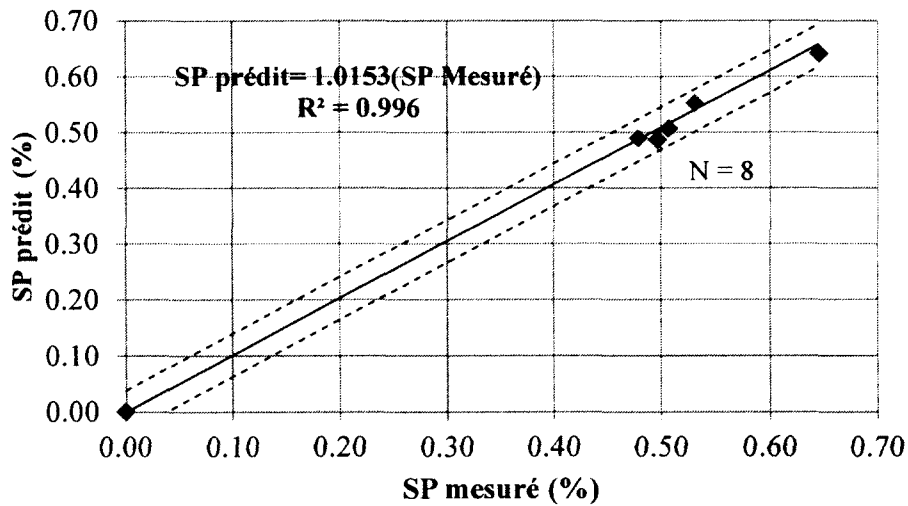


Figure 4.14 Résultats des valeurs prédites et mesurées pour le dosage en SP (%)

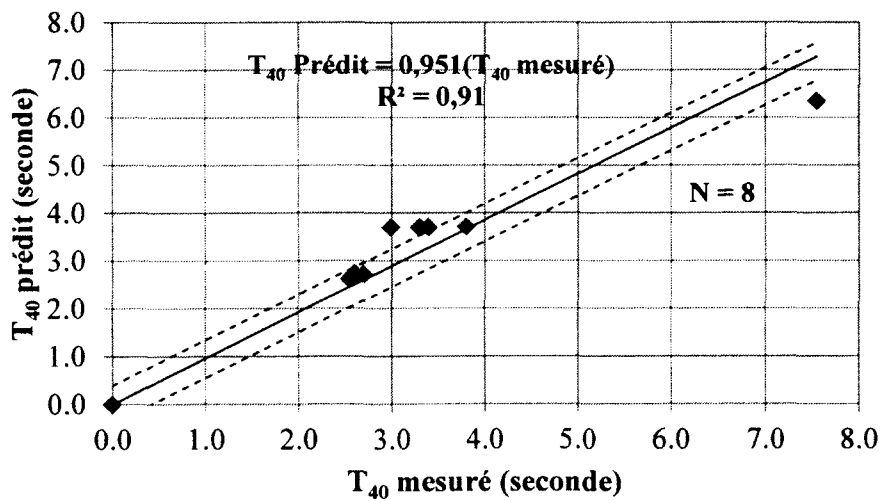


Figure 4.15 Résultats des valeurs prédites et mesurées pour le T_{40} (sec) à 10 minutes

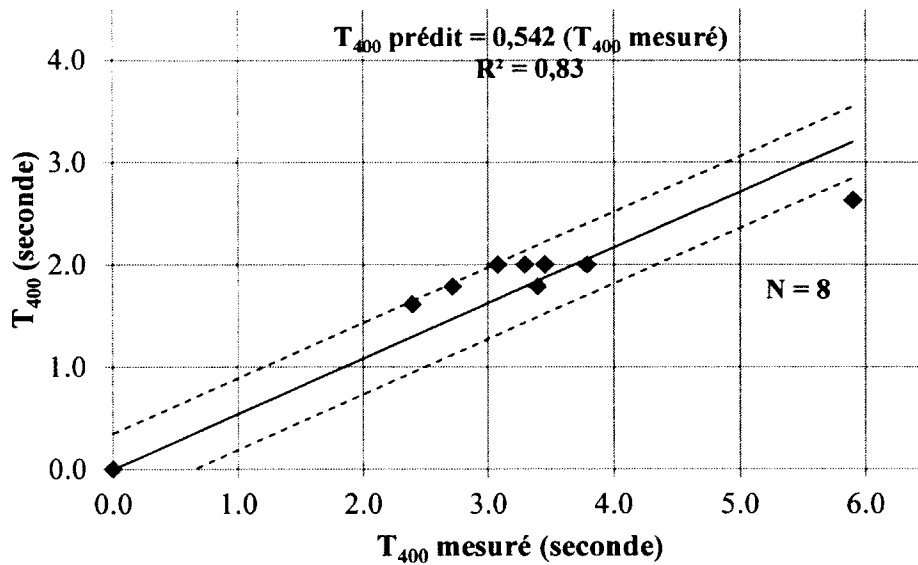


Figure 4.16 Résultats des valeurs prédites et mesurées pour le T400 à 10 minutes (sec)

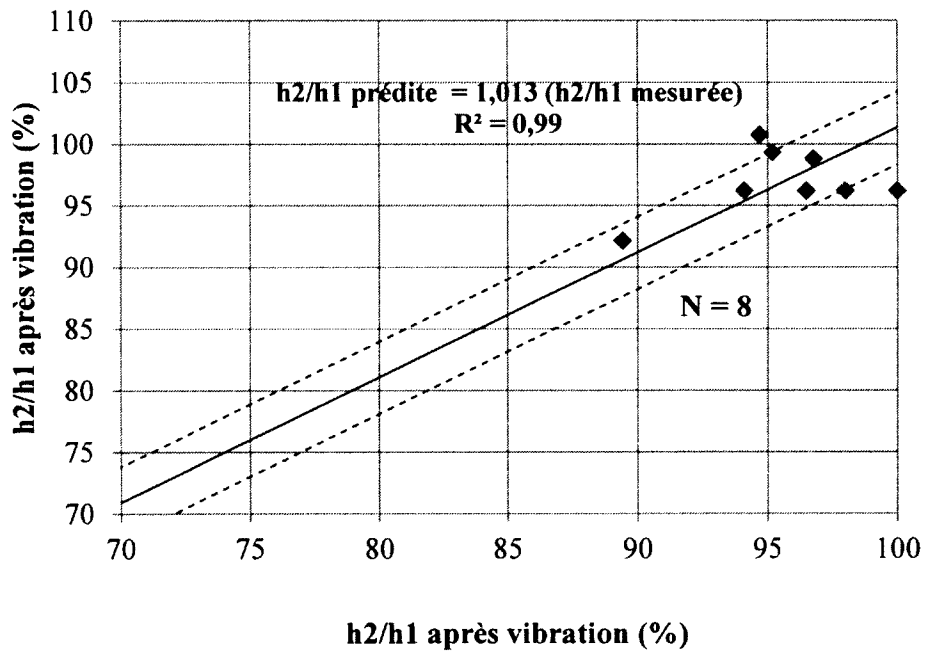


Figure 4.17 Résultats des valeurs prédites pour la capacité de remplissage après vibration et à 10 minutes (%)

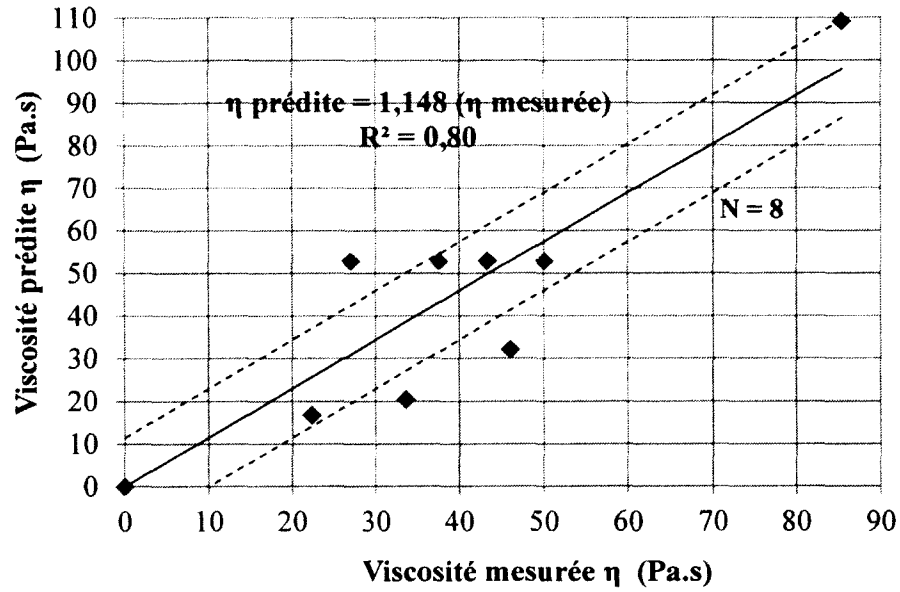


Figure 4.18 Résultats des valeurs prédites et mesurées pour la viscosité plastique (Pa.s)

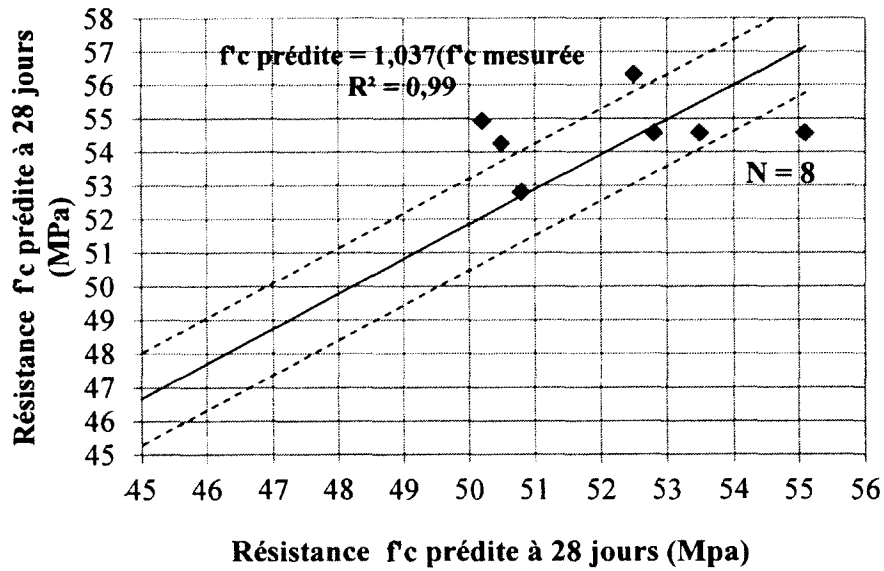


Figure 4.19 Résultats des valeurs prédites et mesurées pour la résistance à la compression à 28 jours (MPa)

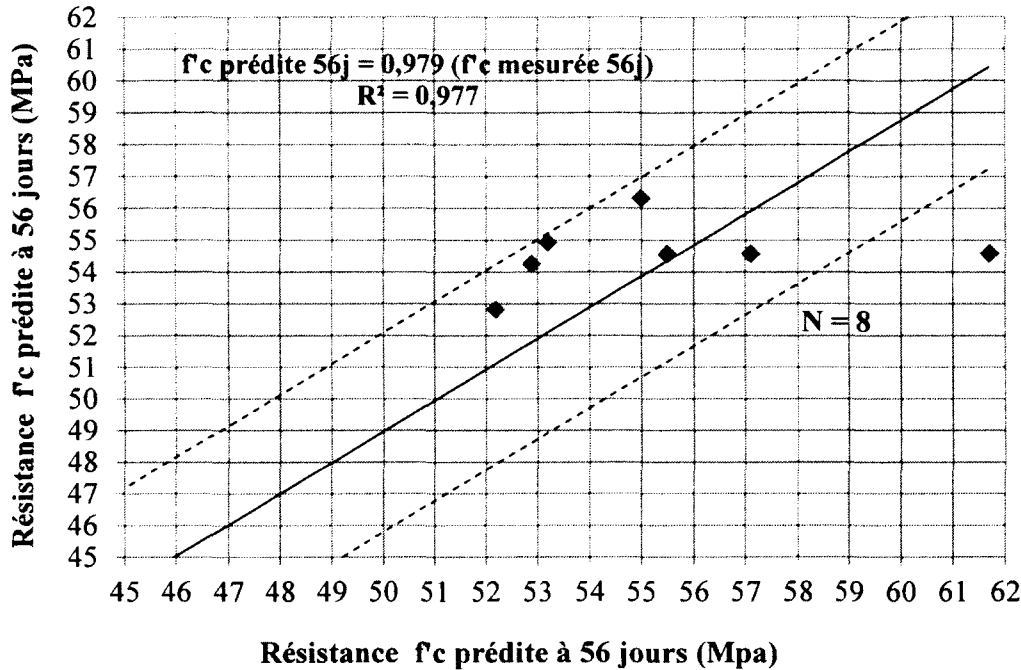


Figure 4.20 Résultats des valeurs prédites et mesurées pour la résistance à la compression à 56 jours (MPa)

4.5.6 Exploitation des modèles statistiques

A partir des modèles mathématiques établis et de la validation réalisée concernant la fiabilité de ces modèles, nous avons tracé les courbes iso-réponses pour chaque modèle validé et possédant au moins deux paramètres significatifs pour évaluer leur incidence dans les propriétés mesurés.

La figure 4.21 présente les iso-réponses de dosage en SP (%), correspondant à des rapports faible (0,47) et élevé (0,53) de S/G. Ces iso-réponses montrent qu'une diminution du rapport E/L résulte en une augmentation de la demande en SP. Dans le cas du faible rapport S/G, si l'on veut continuer à utiliser un même dosage de SP, une réduction du rapport E/L de 0,385 à 0,370 nécessite une augmentation du dosage en liant de 35 kg/m³, tandis que pour un rapport élevé de S/G, une augmentation du dosage en liant de 40 kg/m³ est requise pour cette réduction de rapport E/L mentionné. On remarque aussi une augmentation du dosage de SP lorsque nous passons d'un faible rapport S/G à un rapport élevé.

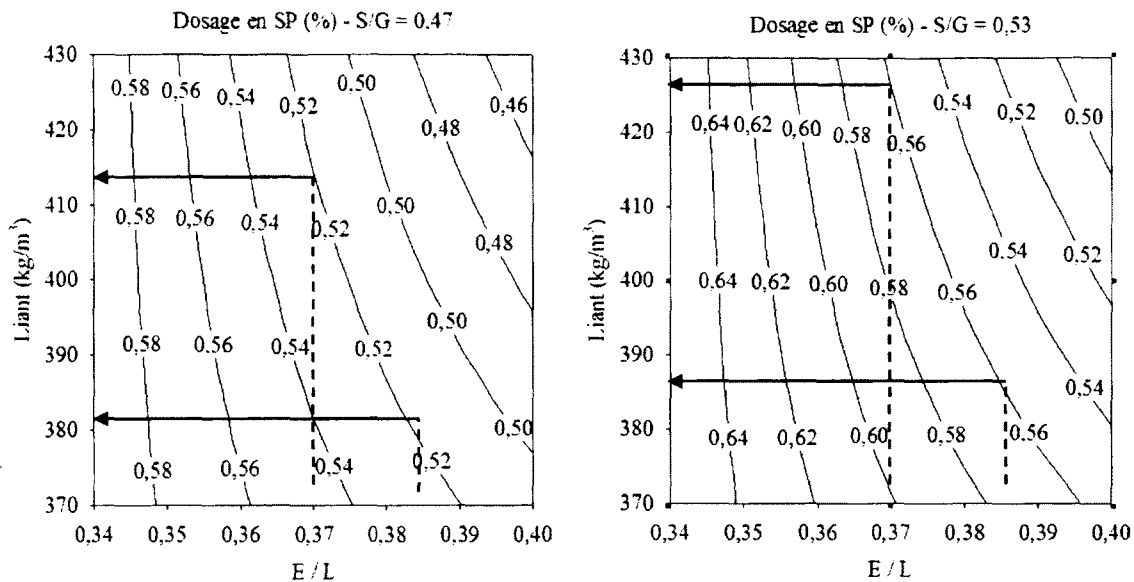


Figure 4.21 Diagrammes Iso-réponses pour le dosage en SP (%)

La figure 4.22 présente le diagramme d'iso-réponses pour le temps d'écoulement T_{40} correspondant à un rapport moyen S/G de 0,50. On remarque qu'une diminution du rapport E/L résulte en une augmentation du temps T_{40} , ceci étant plus critique lorsque le rapport E/L est entre 0,34 et 0,37, car cette augmentation du temps T_{40} est normalement traduite par une augmentation de la viscosité plastique du béton. Ceci peut être vérifié dans notre cas avec les diagrammes combinés de viscosité plastique présentés dans la figure 4.15.

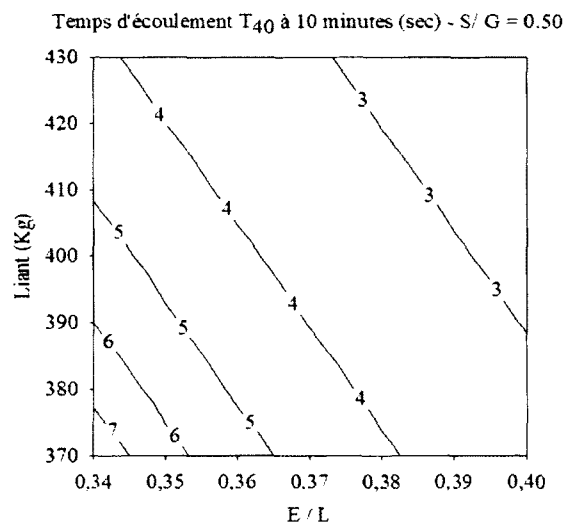


Figure 4.22 Diagramme Iso-réponse pour le temps d'écoulement T_{40}

Un rapport optimal entre 0,37 à 0,40 peut être considéré pour avoir des temps T_{40} optimaux (3 à 4 secondes) au centre de la bande recommandée pour un BAP entre 2 à 7 secondes.

La figure 4.23 présente les iso-réponses combinées pour la viscosité plastique et le dosage en SP (%) correspondant à des rapports faible (0,47) et élevé (0,53) de S/G. Ces diagrammes nous montrent qu'une diminution du rapport E/L occasionne une augmentation de la viscosité et du dosage en SP. En plus, pour un même rapport E/L et une teneur en liant fixe, il existe une augmentation significative de la viscosité plastique d'au moins deux fois pour un rapport élevé S/G 0,53 au lieu de 0,47. À cause de cette augmentation de la viscosité, il est nécessaire d'ajouter au moins 0,05% de SP pour maintenir les mêmes conditions initiales de fluidité du béton. Des niveaux de viscosité entre faible à moyen peuvent être obtenus lorsque nous avons un rapport E/L entre 0,37 à 0,40 et un rapport S/G de 0,47 et entre moyen et élevé pour un rapport S/G 0,53.

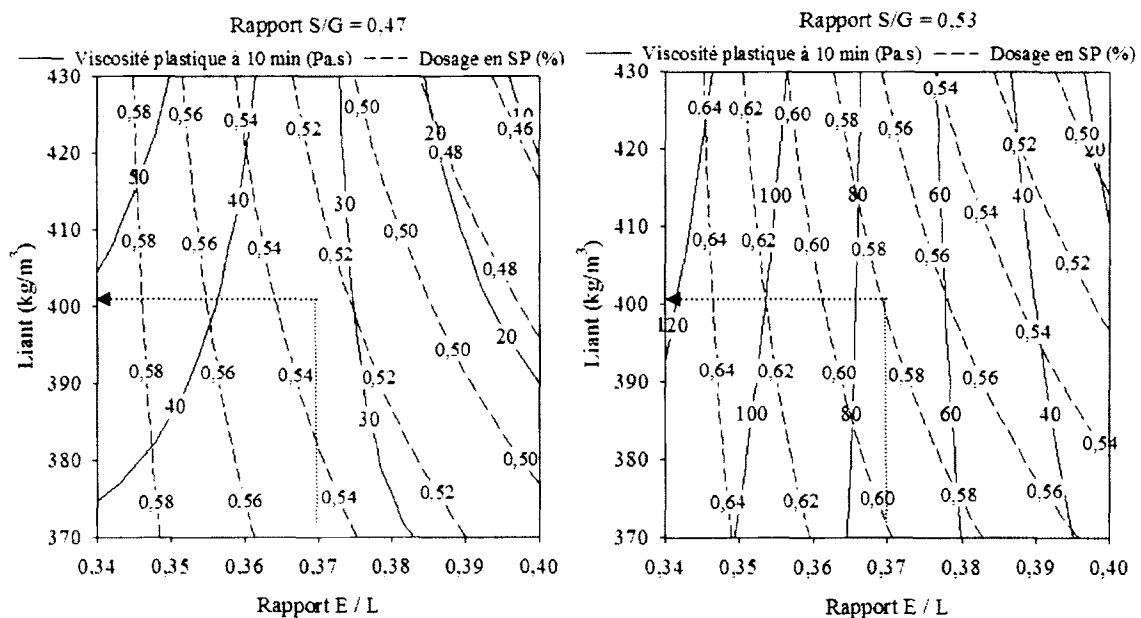


Figure 4.23 Diagrammes Iso-réponses de la viscosité plastique (Pa.s) combinées avec le dosage en SP (%)

En ce qui concerne les résultats de résistance à la compression, nous présentons dans la figure 4.24 les iso-réponses combinées pour les résistances f_c à 28 et 56 jours et le dosage en SP (%) pour un seul rapport S/G égal à 0,47, étant donné que ce paramètre ne présente

pas d'influence sur la résistance f_c , selon le modèle mathématique proposée à partir du tableau 4.9. À partir de deux diagrammes d'iso-réponses on remarque une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation du rapport E/L. On remarque aussi que c'est le rapport E/L qui montre une influence importante à tous les âges des résistances évaluées. Cet effet est plus important que celui de S/G et ayant des valeurs optimales entre 0,37 et 0,40 avec une demande minimale de SP pour accomplir la résistance à la compression du tableau 2.4. Une réduction du rapport E/L est accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression, mais aussi d'une augmentation du dosage en SP afin de préserver le même niveau de fluidité du béton.

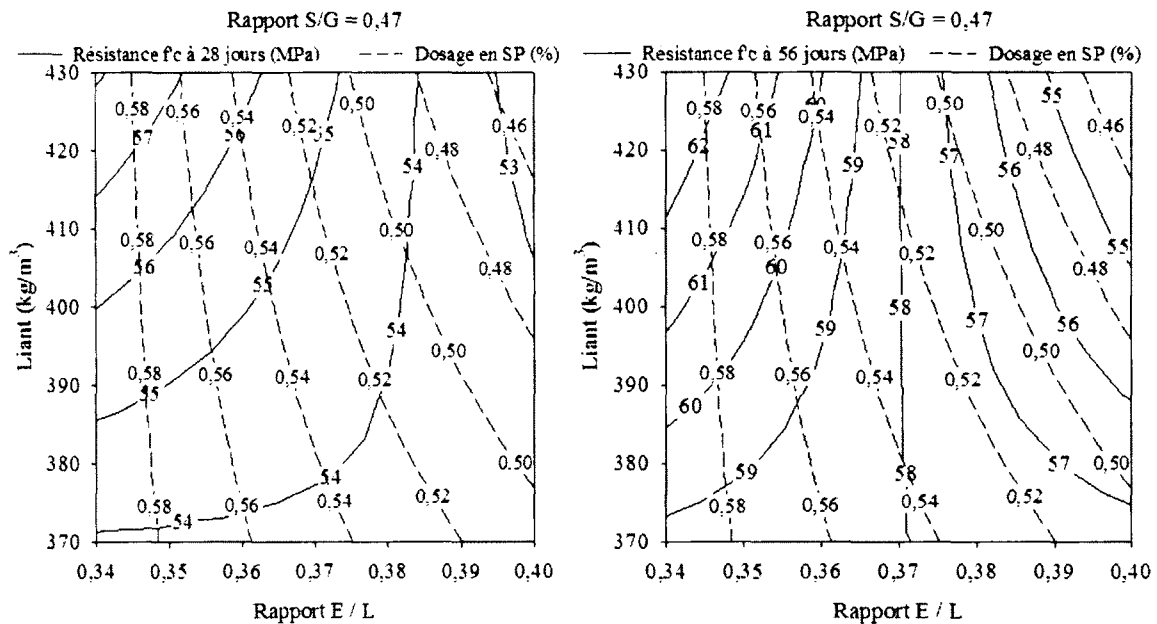


Figure 4.24 Diagrammes Iso-réponses de la résistance à la compression à 28 et 56 jours (MPa) combinées avec le dosage en SP (%)

À partir des résultats obtenus et présentés dans les tableaux 4.6 et 4.7, nous allons procéder à des analyses complémentaires sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et des propriétés mécaniques à l'état durci.

4.5.7 Perte d'étalement dans le temps

La figure 4.25 consigne les résultats d'étalement mesurés à 10 et 70 minutes afin de vérifier l'accomplissement de cette propriété dans le temps, selon la limite établie de 500 ± 50 mm sans l'ajout additionnel de SP ou un autre adjuvant chimique pendant les premiers 60 minutes. Pour les 18 mélanges préparés, une perte d'étalement moyenne de 45,8 mm et un écart type de 19,6 mm ont été obtenus. En plus, la majorité des mélanges de BSAP-I (Excluant M10, M12 et M14) a conféré une perte d'étalement acceptable entre 20 et 50 mm. Ce comportement peut être expliqué par l'inclusion d'un dosage minimale d'un adjuvant plastifiant réducteur d'eau dans toutes les formulations de BSAP-I. Cet adjuvant étant en combinaison avec SP permet un maintien de l'étalement plus uniforme dans le temps. En ce qui concerne les mélanges de BSAP-I M10, M12 et M14, une perte significative d'étalement égal à 60 mm dans les deux premiers cas et à 100 mm dans le dernier cas sont obtenues. Ces valeurs sont reliées aux paramètres significatifs de seuils τ_0 et viscosités η , ceux-ci seront discutés plus en détails dans la section 4.5.11.

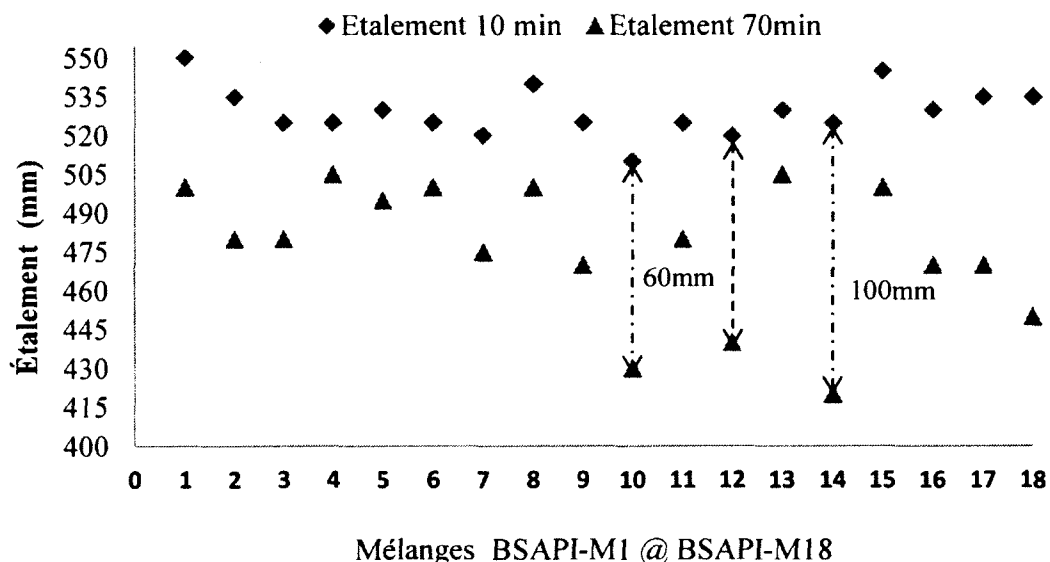


Figure 4.25 Résultats de l'étalement de 18 BSAP-I mesurés à 10 et 70 minutes

4.5.8 T_{40} et étalement en fonction du rapport E / L

Nous avons mesuré le temps d'écoulement T_{40} des BSAP-I pendant l'essai d'étalement. Les résultats sont exprimés dans la figure 4.26 en fonction des rapports E/L associés. Dans la majorité de cas, on remarque pour les BSAP-I ayant des rapports E/L de 0,34, 0,37 et 0,40, l'existence d'un temps T_{40} entre 2 et 7 secondes qui est très semblable au T_{50} recommandé pour un BAP [Hwang, 2006]. Dans cet essai, on remarque aussi que les résultats de T_{40} pour les mélanges M10 et M12 sont moins performants par rapport au reste des BSAP-I. Tel que nous savons, un temps T_{40} élevé est associé à une viscosité plus significative du béton, ceci pouvant occasionner une perte significative d'étalement dans le temps, tel que démontré par les données précédentes d'étalement. Une faible teneur en pâte par rapport au reste des BSAP-I est associée aux mélanges M10, M12 et M7 présentant un temps T_{40} élevé. Dans le cas du mélange M9 ayant un rapport E/L de 0,42, il est normalement associé à une faible viscosité, tel que nous pouvons vérifier dans la figure 4.26.

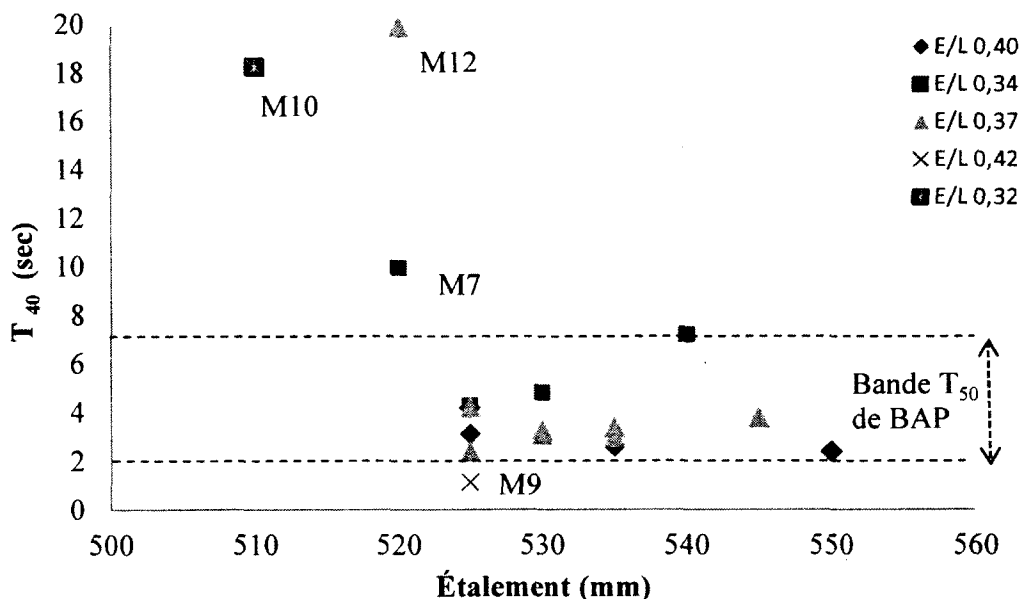


Figure 4.26 Mesure T_{40} à 10 minutes en fonction de l'étalement et du rapport E/L

4.5.9 Corrélation T40 de l'étalement et T₄₀₀ de la L-Box

La figure 4.27 présente les résultats correspondant aux temps T₄₀ de l'essai d'étalement et T₄₀₀ de la boîte L-Box en fonction du rapport E/L pour mélanges de BSAP-I préparés. On remarque dans cette figure l'existence d'une bonne corrélation linéaire entre ces deux propriétés montrant une valeur R² de 0,94. Dans le cas des mélanges avec des rapports E/L de 0,40 et 0,37, ils possèdent des temps T₄₀ et T₄₀₀ très semblables à ceux recommandés pour un BAP. Les mélanges M10 et M12 sont associés à une faible performance au niveau du temps de passage T₄₀₀ mesuré dans la boîte L-Box, à cause de l'existence des viscosités très élevées que nous n'avons pas pu mesurer initialement avec le rhéomètre ICAR.

En ce qui concerne les mesures T₄₀₀ pour les mélanges de BSAP-I M5 et M7 ayant un rapport E/L de 0,34, ils possèdent un temps T₄₀₀ plus longue. Ceci peut être associé à une viscosité plastique élevée du béton entre 120 et 140 Pa.s, tel que nous pouvons constater dans la figure 4.26.

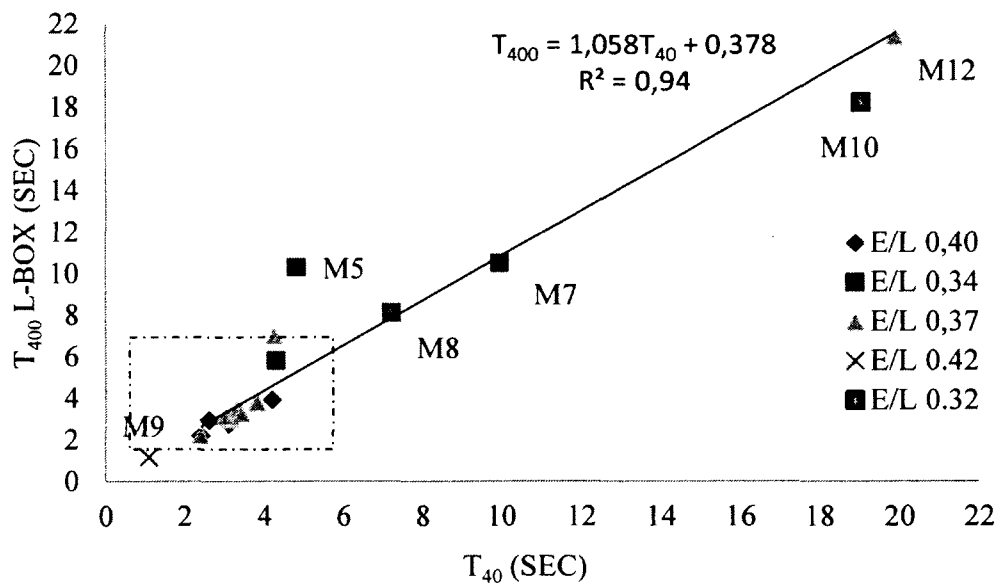


Figure 4.27 Relation entre les temps T₄₀ et T₄₀₀ à 10 minutes en fonction du rapport E/L

4.5.10 Capacité de remplissage avant et après vibration

Nous présentons dans la figure 4.28 les résultats de capacité de remplissage avant et après vibration des BSAP-I dans la boîte L-Box. À partir de ces résultats, on remarque que les BSAP-I possèdent une capacité de remplissage après vibration d'au moins 80% et plus, les mélanges M10 et M12 qui ont conféré une capacité de remplissage près de 80%. Tel que nous avons analysé dans les sections précédentes, ces deux bétons ont été associés aux pertes d'étalement et de temps d'écoulement T_{40} et T_{400} très élevés.

En ce qui concerne les mélanges de BSAP-I ayant des rapports E/L de 0,40 (M1 à M4) et de 0,37 (M15 à M18), ces bétons ont été les plus performants pas seulement au niveau de fluidité et des temps d'écoulement, tel que nous venons de les présenter, mais aussi au niveau de capacité de remplissage avant et après vibration. Avant vibration, ils ont conféré une capacité de remplissage d'au moins 50% et après vibration une capacité près de 100%.

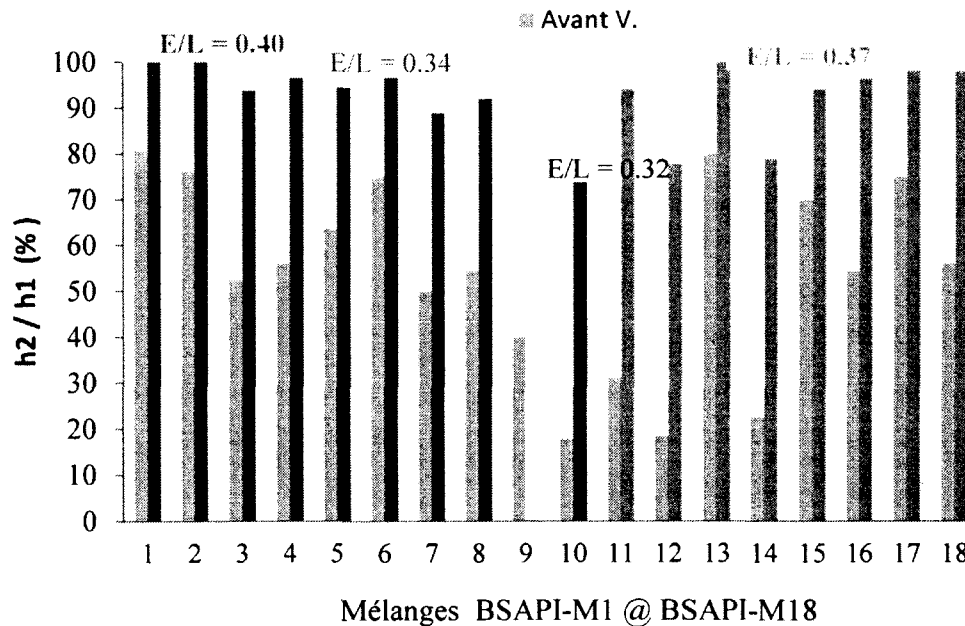


Figure 4.28 Résultats de capacité de remplissage à 10 minutes avant et après vibration

4.5.11 Viscosité plastique – Seuil de cisaillement

Nous présentons dans la figure 4.29 les résultats de seuil τ_0 et de viscosité η obtenus avec le rhéomètre ICAR pour tous les mélanges de BSAP-I. On remarque une fluctuation de la viscosité entre 10 et 135 Pa.s, c'est-à-dire, d'un niveau faible à un niveau élevé. Les BSAP-I possédant des rapports E/L de 0,40 et 0,37, ils ont conféré des valeurs de seuil τ_0 et de viscosité η très proches de celles obtenus usuellement pour un BAP (seuil : 50 – 200 Pa et viscosité 20 à 100 Pa.s). Ces valeurs sont entre 30 et 320 Pa dans le premier cas et entre 10 et 140 Pa.s dans le deuxième cas. En prenant en compte les résultats précédentes des propriétés mesurés, on remarque que les valeurs optimales de viscosité η et de seuil τ_0 qui ont conféré les meilleurs performances aux BSAP-I au niveau d'étalement (E), de J-Ring (J), de E-J, de capacité de passage et des temps d'écoulement T_{40} et T_{400} sont celles situés à l'intérieur de la boîte (bande rhéologique) illustrée ci-dessous dans la figure 4.32.

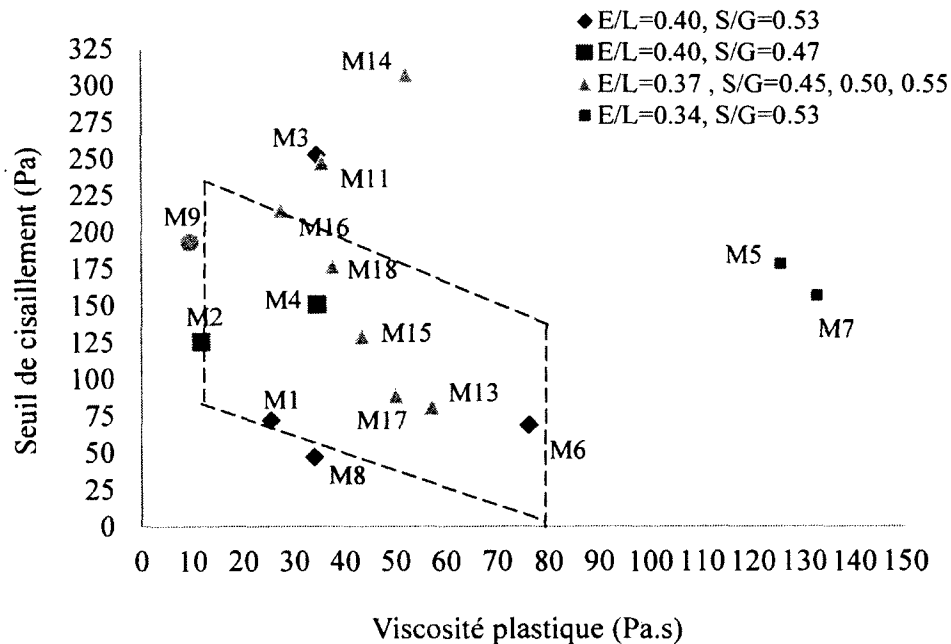


Figure 4.29 Résultats de seuil de cisaillement et viscosité plastique mesurés à 10 minutes

4.5.12 Ségrégation des cylindres vibrés

Nous avons évalué la ségrégation statique des cylindres de 100 x 200 mm vibrés sur table vibrante. Les résultats d'épaisseur du mortier mesurés en haut pour chaque cylindre vibré à 5, 10 et 20 secondes sont présentés sur la figure 4.30. En prenant en compte la méthode expliquée dans la section 3.6.12, cette épaisseur du mortier correspond à la distance de haut du cylindre jusqu'à atteindre une surface de 10% de granulats > 5 mm, ce qui se traduit en une épaisseur limite du mortier égal à 4 mm, valeur établie dans le projet de BSAP pour le bâtiment. On remarque dans la majorité des cas que plus le temps de vibration est long, plus les particules montrent une tendance à migrer vers le bas du cylindre, ce qui occasionne une augmentation significative des épaisseurs du mortier aux cylindres. Cette tendance est vérifiée avec les résultats de ségrégation sur table vibrante obtenus dans le projet de BSAP pour le bâtiment [Leclerc, 2010]. Un temps de vibration de 5 secondes n'occasionne pas de ségrégation aux cylindres de BSAP-I. Ce temps optimal est très semblable à celui appliqué avec l'aiguille vibrante pour améliorer la capacité de remplissage des BSAP-I.

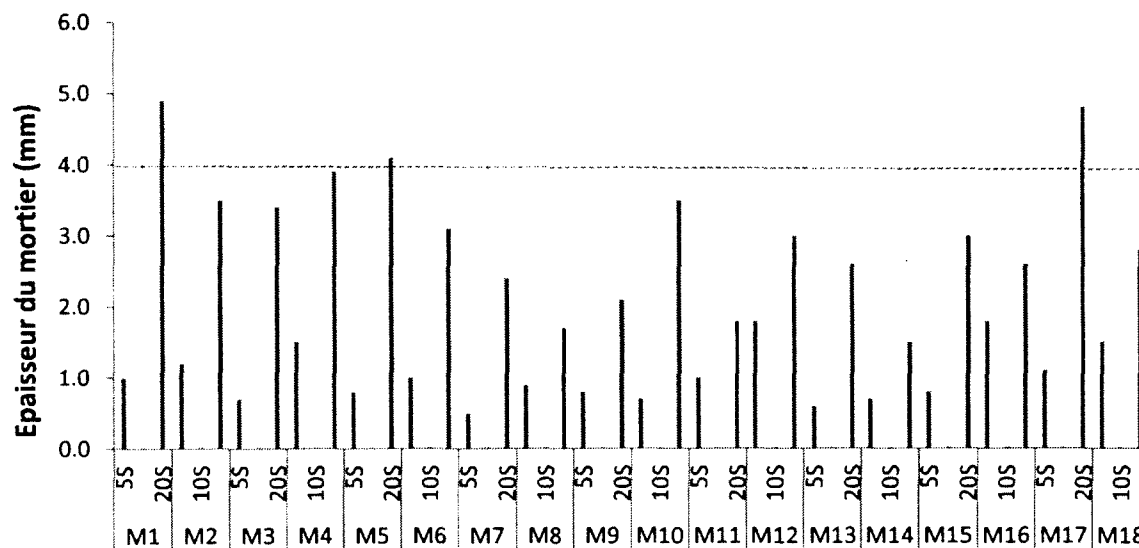


Figure 4.30 Résultats de mesure de l'épaisseur du mortier des cylindres de 100 x 200 mm vibrés à 5, 10 et 20 secondes sur table vibrante pour l'analyse de ségrégation statique

4.5.13 Résistance à la compression

En ce qui concerne la résistance à la compression des BSAP-I, on remarque dans la figure 4.31 qu'un niveau de résistance à 1 jour entre 10 et 17 MPa a été obtenu pour les mélanges de BSAP-I. Des résistances très faibles ont été obtenues à cet âge pour les mélanges M10 et M12, ceci à cause d'un effet retardateur de la prise du béton occasionnée par le dosage élevé de SP et qui a été vérifié durant le décoffrage des 3 cylindres à 24 heures. On remarque aussi qu'un niveau de résistance supérieur à 50 MPa à 28 jours a été obtenu dans tous les cas, tel que spécifié dans les devis techniques indiqués au tableau 2.4. En ce qui concerne les valeurs f_c à l'âge de 56 jours, il existe une augmentation de la résistance entre 2 à 7 MPa par rapport à celle obtenue à 28 jours, étant les valeurs plus hautes associées aux rapports E/L plus faibles, mais aussi aux BSAP-I plus performants ayant un rapport E/L de 0,37 (BSAPI-M17 et M18 possèdent un f_c élevé respectivement de 57 et 62 MPa).

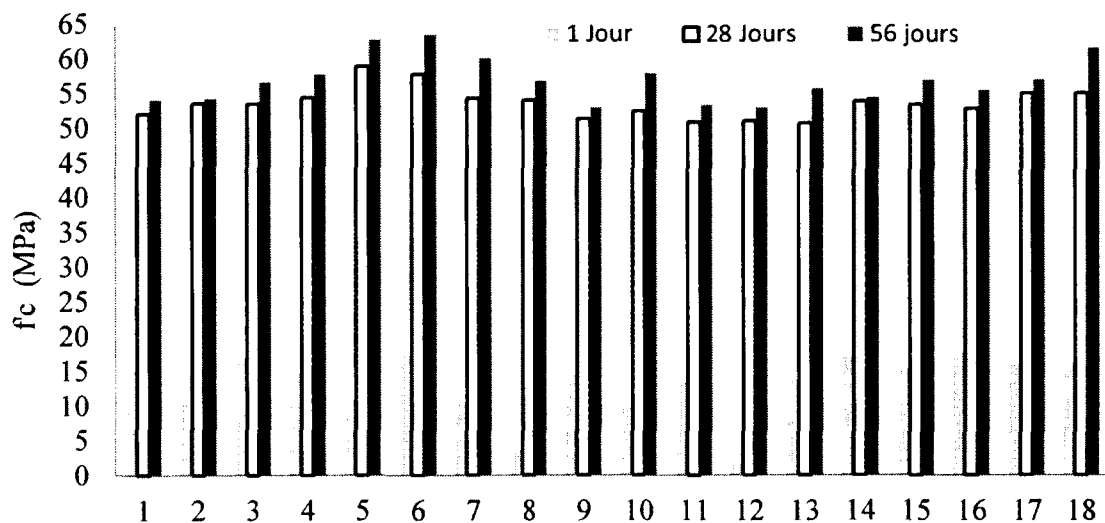


Figure 4.31 Résultats de résistance des cylindres de BSAP-I aux âges de 1, 28 et 56 jours

4.5.14 Analyse coût / performance des BSAP-I

La figure 4.32 présente les résultats de l'analyse du coût des BSAP-I par m³ calculés pour chaque mélange préparé. Ces résultats ont été considérés dans l'analyse global coût/performance. On remarque que les BSAP-I M3, M4 et M8 présentent des coûts plus faibles par rapport au mélange central. Les mélanges M3 et M4 sont les plus performants au niveau des propriétés rhéologiques (tel que nous pouvons constater au tableau 4.11).

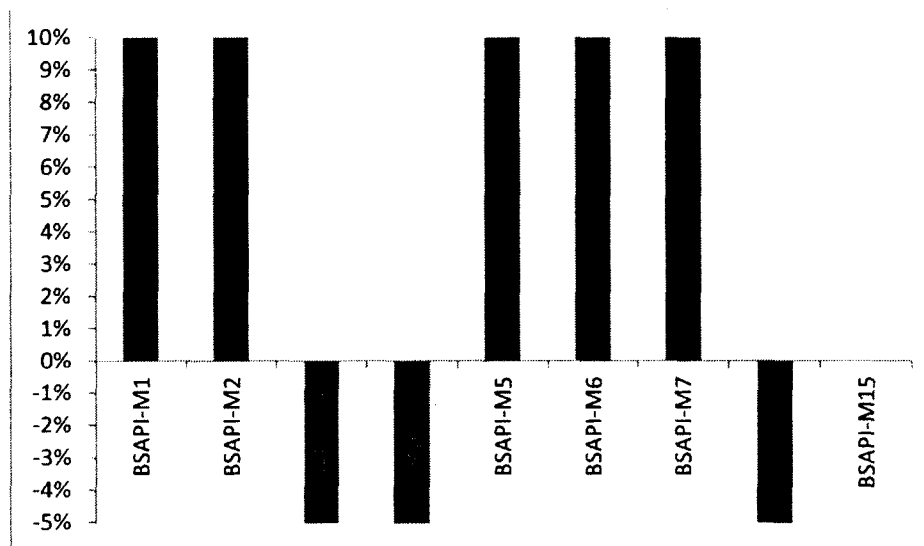


Figure 4.32 Relation du coût par m³ des BSAP-I par rapport au mélange central (M15)

En ce qui concerne l'analyse coût/performance des BSAP-I, nous avons considéré les coûts des BSAP-I indiqués ci-dessus et les résultats des propriétés rhéologiques mesurés montrant un effet significatif sur la performance des BSAP-I, tel qu'analysé dans les sections précédentes. Ces propriétés rhéologiques sont les temps T_{40} et T_{400} , la perte d'étalement, la capacité de remplissage avant et après vibration, l'épaisseur du mortier de l'analyse de ségrégation statique et la résistance à la compression. Le critère établi pour assigner des indices de qualification selon la performance associée a été que pour chaque propriété étudiée 100% correspond à la meilleure performance (minimum ségrégation, minimum de coût, résistance en compression maximale, capacité de remplissage maximale, etc) alors que 0% correspond à la plus mauvaise performance pour le mélange (ségrégation maximum, capacité de remplissage minimal, etc.). L'ensemble des résultats sont consignés dans le tableau 4.11.

TABLEAU 4.11 ANALYSE COÛT / PERFORMANCE DES BSAP-I

M _i	\$/m ³ (1)	%	f _c (2)	%	T ₄₀	%	h ₂ /h ₁ (AV.) (3)	%	h ₂ /h ₁ (Apr.) (3)	%	T ₄₀₀	%	Perte étal. (4)	%	E. mortier (5)	%	M _i	Moyen ne (%)	ordre de choix
M4	135	100,0	54,4	44,4	3,10	78,0	56,0	12,0	96,5	82,4	2,7	72,9	25	50,0	3,0	38,5	M4	68,3	1
M2	146	47,5	53,5	34,3	2,60	88,0	76,2	52,4	100,0	100,0	2,9	68,8	55	-10,0	2,0	76,9	M2	65,4	2
M13	143	60,7	50,7	0,0	3,10	78,0	80,0	60,0	100,0	100,0	3,0	68,1	20	60,0	3,2	30,8	M13	65,4	3
M17	142	13,3	57,8	86,6	4,28	54,4	75,0	50,0	100,0	100,0	5,8	20,3	20	60,0	2,9	42,3	M17	59,8	4
M6	156	56,6	52,0	16,1	2,40	92,0	80,8	61,6	100,0	100,0	2,2	82,2	35	30,0	4,3	-11,5	M6	59,5	5
M1	147	72,7	55,1	52,8	2,99	80,2	75,0	50,0	100,0	100,0	3,1	66,4	60	-20,0	3,4	23,1	M1	58,9	6
M18	142	72,7	55,1	53,2	3,40	72,0	56,0	12,0	98,0	90,2	3,2	63,6	55	-10,0	2,9	42,3	M18	57,0	7
M15	142	72,7	53,5	33,7	3,80	64,0	70,0	40,0	94,1	70,6	3,8	54,4	45	10,0	3,0	38,5	M15	53,9	8
M9	138	92,2	51,4	8,2	1,14	117,2	40,0	-20	84,2	21,1	1,1	100,0	55	-10,0	2,3	65,4	M9	52,0	9
M16	142	72,7	52,8	25,9	3,30	74,0	54,4	8,8	96,5	82,4	3,5	60,0	50	0,0	3,1	34,6	M16	50,2	10
M3	135	40,4	50,9	1,7	2,40	92,0	31,3	-38	94,1	70,6	2,2	81,4	50	0,0	1,7	88,5	M3	46,9	11
M11	152	98,0	53,5	33,8	4,20	56,0	52,4	4,8	93,8	68,8	3,9	52,5	45	10,0	3,9	3,8	M11	45,5	12
M8	138	78,3	54,0	40,1	7,20	-4,0	54,5	9,1	92,0	60,0	8,1	-18,6	35	30,0	3,0	38,5	M8	33,9	13
M5	157	10,0	58,9	100	4,81	43,8	63,6	27,3	94,4	72,2	10,3	-55,9	30	40,0	4,2	-9,2	M5	31,2	14
M14	141	75,9	53,9	38,9	4,23	55,4	22,5	-55	78,9	-5,3	7,0	-0,3	0	100,0	1,4	100	M14	14,6	15
M7	143	52,9	54,3	44,2	9,95	-59,0	50,0	0,0	88,9	44,4	10,5	-59,3	25	50,0	4,1	-3,8	M7	11,4	16
M10	156	0,0	52,4	20,5	18,22	-224	17,9	-64	73,7	-31,6	19,0	-204	60	-20,0	2,0	76,9	M10	-73,7	17
M12	140	52,9	51,0	3,8	19,88	-258	18,4	-63	77,8	-11,1	21,4	-244	60	-20,0	2,0	76,9	M12	-73,4	18
Max	159	0	58,9	100	7	0	100	100	100	100	7,0	0	50	0	4,0	0			
	M _i	x	M _i	x	M _i	x	M _i	x	M _i	x	M _i	x	M _i	x	M _i	x			
Min	139	100	50,7	0	2	100	50	0	80	0	1,1	100	0	100	1,4	100			

D'après l'analyse de performance réalisée, en tenant compte du coût et des résultats à l'état frais et durci des BSAP-I préparés dans la phase III.2A, les deux mélanges qui se distinguent sont:

BSAPI-M2 (E/C = 0,40, S/G = 0,47 et liant 430 kg/m³)

BSAPI-M4 (E/C = 0,40, S/G = 0,47 et liant 370 kg/m³)

En plus, en prenant en compte les devis techniques des partenaires de la chaire industrielle du CRSNG indiqués dans le tableau 2.4, pour le choix de deux mélanges optimaux et pouvoir réaliser l'étude paramétrique des BSAP-I choisis, deux options ont été proposés :

Option 1:

Prendre deux mélanges BSAPI-M2 et BSAPI-M4 pour étudier l'effet de deux types de ciments ternaires : le ciment GUB F/SF utilisé dans cette phase et le ciment GUB S/SF faisant partie d'un partenaire de la chaire, ainsi que pour étudier l'effet de deux types de SP, le PNS EUCON 37 utilisé dans cette phase et le PCE Plastol 6400 pour faire la caractérisation complète des BSAP-I.

Option 2:

Prendre seulement le mélange M2 (E/C = 0,40) et prendre un mélange qui correspond au point central (E/C = 0,37, S/G = 0,50 et liant 400 kg/m³) pour étudier l'effet des ciments ternaires GUB F/SF et GUB S/SF avec les 2 SP mentionnés ci-dessus. Sachant bien que le rapport E/C = 0.37 est exigé par les partenaires le MTQ et la ville de Montréal afin de satisfaire le devis de performance présentés dans le tableau 2.4.

Suite à la discussion avec des partenaires de la chaire industrielle CRSNG, les BSAPI-M4 et celui du point central ont été finalement choisis pour faire leur caractérisation complète à l'état frais et durci. Complémentairement, nous avons choisi le BSAPI-M2 avec les constituants utilisés dans cette phase de travail pour faire sa caractérisation complète.

4.5.15 Conclusions

L'objectif de cette partie de notre étude a été consacré à l'optimisation de mélanges de BSAP-I en utilisant un plan d'expériences pour modéliser l'effet de trois paramètres de formulation, tels que les rapports E/L et S/G, ainsi que la teneur en liant (kg/m^3), sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et la résistance en compression à l'état durci. Ensuite, à partir des modèles statistiques obtenus et de l'analyse comparative coût/performance, la proposition de deux mélanges optimaux pour faire leur caractérisation avec des autres produits de ciments combinés et des adjuvants chimiques de la chaire industrielle du CRSNG. À la lumière des résultats obtenus dans cette étude, nous pouvons retenir les points suivants :

- Plan d'expériences
 - L'utilisation d'un plan factoriel contenant trois paramètres à deux niveaux 2^3 nous a permis d'obtenir des modèles statistiques capables de prédire les résultats des propriétés rhéologiques à l'état frais et des résistances en compression à l'état durci pour l'optimisation de mélanges de BSAP-I ayant des rapports E/L entre 0,34 à 0,40, S/G entre 0,47 à 0,53 et une teneur en liant entre 370 et 420 kg/m^3 .
 - L'exploitation des modèles établis en utilisant les courbes iso-réponses démontre l'influence du rapport E/L presque dans la totalité des propriétés rhéologiques et des résistances mécaniques, étant les valeurs optimales entre 0,37 et 0,40 pour la conception des BSAP-I avec des dosages minimales en SP, des temps d'écoulement les plus adéquates (au centre des limites d'un T_{50} de BAP), des viscosités moyennes, des capacités de remplissages les plus élevées et des résistances à la compression acceptables, en accomplissant les devis techniques des partenaires de la chaire industrielle (Tableau 2.4).
- Analyse coût / performance
 - Les deux mélanges préparés avec des rapports $E/C = 0,40$, $S/G = 0,47$, et une teneur en liant de 370 kg/m^3 dans le premier cas, et des rapports $E/C = 0,37$, $S/G = 0,50$ et une teneur liant de 400 kg/m^3 dans le deuxième cas ont été choisi pour réaliser une étude paramétrique et la caractérisation complète des propriétés frais et durci au laboratoire.

-
- Rhéologie des BSAP-I
 - Une bande rhéologique a été déterminée pour la conception optimale des BSAP-I nécessitant une vibration minimale. Ceci avec un seuil de cisaillement jusqu'à 230 et une viscosité caractérise entre 10 et 50 Pa.s et un niveau moyen entre 50 et 80 Pa.s pour conférer aux BSAP-I des bonnes performances rhéologiques.
 - Une bonne corrélation entre les temps d'écoulement T_{40} et T_{400} a été trouvé pour les BSAP-I préparés. Ces temps ont varié entre 2 et 7 secondes, de la même façon que pour un T_{50} d'un BAP.

4.6 Phase III.2B Optimisation des BSAP-I

Cette partie concerne l'évaluation paramétrique des mélanges de BSAP-I optimisés pour la mise en place des infrastructures. À partir de deux bétons optimisés dans la phase précédente, nous avons étudié l'effet de deux types de liants ternaires et deux types d'adjuvants SP sur la performance des BSAP-I à l'état frais et durci. Le ciment GUB F/SF contenant 20% des cendres volantes et 5% de fumée de silice ainsi que le ciment GUB S/SF, contenant 20% du laitier de haut fourneau et 5% de fumée de silice ont été utilisés. L'adjuvant SP Eucon 37, un Polynaphthalene sulfonates (PNS) utilisé aussi dans la phase précédente et l'adjuvant SP Plastol 6400, un polycarboxylate (PCE) ont été considérés pour ces mélanges. Les formulations des BSAP-I préparés sont présentées au tableau 4.12.

Une gâchée de 220 litres a été préparée pour chaque BSAP-I préparé afin de mesurer les propriétés rhéologiques à l'état frais et prélever les échantillons de cylindres et prismes de BSAP-I pour évaluer leurs performances mécaniques et leur durabilité, selon les devis techniques établis au tableau 3.1.

TABLEAU 4.12 DOSAGE PAR M³ DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)

Code	DOSAGE DES INGREDIENTS EN SEC								Teneur en adjuvant (cc/100kg liant)			
	E/L	S/G	Eau (kg/m ³)	Ciment GUb F/SF (kg/m ³)	Ciment GUb S/SF (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Pierre 5-14 mm (kg/m ³)	Pierre 5-20 mm (kg/m ³)	P	SP- PNS	SP- PCE	AE A
									Eucon		Plastol 6400	Air extra
DX	37											
BSAPI- EPM1	0,40	0,47	171	430		759	622	266	150	1300		330
BSAPI- EPM1B	0,40	0,47	148	370		812	665	285	150	1520		340
BSAPI- EPM2	0,40	0,47	148		370	814	667	286	150	1500		330
BSAPI- EPM3	0,40	0,47	148	370		812	665	285	150		870	240
BSAPI- EPM4	0,37	0,50	148	400		850	618	265	150	1530		265
BSAPI- EPM5	0,37	0,50	148		400	853	620	266	150	1510		250
BSAPI- EPM6	0,37	0,50	148	400		850	618	265	150		780	150

4.6.1 Présentation des résultats à l'état frais et durci

À la lumière des résultats obtenus (tableaux 4.13 et 4.14) pour les mélanges d'optimisation de BSAP-I présentés au tableau 4.12, on remarque l'obtention des propriétés rhéologiques et de résistances mécaniques très semblables à celles obtenues dans la phase précédente et des très bonnes performances par rapport à la durabilité en face aux attaques des gel/dégel, écaillage, pénétration des ions chlores et fissuration de retrait par séchage dans le temps. Ces propriétés mesurées à l'état frais et durci seront expliquées plus en détails dans les sections présentées tout de suite.

4.6.2 Paramètres d'ouvrabilité

En ce qui concerne les demandes des adjuvants SP et AEA pour concevoir les mêmes propriétés rhéologiques obtenues dans la phase précédente, lorsque nous utilisons un ciment

ternaire contenant du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice (GUb S/SF) au lieu d'utiliser un liant contenant de la cendre volante et de la fumée de silice (GUb F/SF), les demandes en SP et AEA sont respectivement inférieures d'environ 20 et 10 ml/100kg de ciment. Cette réduction de la teneur en adjuvants est due à la présence du laitier de haut fourneau, ceci permettant d'améliorer la fluidité d'un béton à l'état frais, tel qu'il a été démontré par des études précédentes [Bleszynski, 2002]. En ce qui concerne l'utilisation de l'adjuvant SP-PCE Plastol 6400, il a occasionné la formation d'une couche de mousse et l'incorporation d'une teneur en air élevée pour les deux BSAP-I préparés (BSAP-IEPM3 et BSAP-IEPM6), étant plus significative dans le premier cas. Ceci peut être associé à une teneur en pâte plus faible de 342 l/m^3 par rapport au BSAP-IEPM6 égal à 352 l/m^3 . Il faut mentionner que la présence de mousse dans le cas du BSAP-IEPM3 nous a empêché de caractériser certains propriétés rhéologiques du béton à l'état frais, tel qu'indiqué au tableau 4.13. En ce qui concerne les demandes en SP-PEC et AEA pour le BSAP-IM6, ceux-ci sont respectivement inférieures d'environ 730 et 100 ml/100 kg de ciment Par rapport aux demandes de SP-PNS et AEA pour une même composition du béton. Ces dosages représentent une réduction de 48% de celui utilisé avec un SP-PNS et de 40% dans le cas d'AEA.

4.6.3 Capacité de remplissage dans la L-Box

Avant vibration, des valeurs de capacité de remplissage entre 45 et 59% sont obtenues, ceci étant très semblables à celles obtenues dans la phase précédente pour les BSAP-I les plus performants. Après vibration du béton dans la boîte L-Box, des valeurs de capacité de remplissage entre 87,5 et 100% ont été obtenues, tels que consignés dans le tableau 4.13. Ces valeurs sont au-dessus du seuil minimale de 80% exigé pour un BAP, afin d'améliorer sa facilité de remplissage pendant la mise en place du béton à l'intérieur du coffrage.

TABLEAU 4.13 RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS DES BSAP-I OPTIMISÉS À 10 MINUTES (PHASE III.2B)

CODE	T. béton (°C)	Étal. E (mm)	J-Ring J (mm)	E-J (mm)	VSI	T ₄₀ (Sec)	τ ₀ (Pa)	η (Pa)	Air (%)	Masse vol. (kg/m ³)	L - Box (2 barres)		Ségrégation statique		Thixotropie au repos						
											Avant vib.		Après		%	COV	15	30	45	60	I. T
											h2/h1 (%)	T ₄₀₀ (sec)	h2/h1 (%)	Pa				Pa.Pa/min			
BSAPI-M1	21,1	525	525	0	0	3,1	230,0	18,7	8	2244	54,5	2,9	100,0	13,8	1,65	388	602	841	1207	7372	
BSAPI-M1B	17,1	530	520	10	0	3,2	141,2	42,8	8	2260	52,2	3,8	93,8	17,7	3,94	431	547	701	804	3660	
BSAPI-M2	18,0	520	520	0	0	5,1	84,6	51,9	8,5	2250	52,0	6,1	94,1	16,3	1,49	345	493	630	754	3140	
BSAPI-M3	16,0	560	545	15	2	2,8	x	x	10	2221	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BSAPI-M4	18,2	520	530	-10	0	3,9	71,4	73,1	6,8	2292	59,1	4,1	88,2	11,4	1,91	474	602	911	1207	7922	
BSAPI-M5	19,0	530	515	15	0	7,3	64,7	93,8	6,7	2290	46,2	8,4	87,5	9,57	2,09	560	711	981	1408	10503	
BSAPI-M6	18,0	545	530	15	1	3,8	17,0	60,5	7,9	2283	50,0	4,4	93,3	18,3	3,8	388	547	771	905	4589	

x : ces propriétés n'ont pas été mesurées à cause de la présence significative de mousse dans le béton

TABLEAU 4.14 RÉSULTATS À L'ÉTAT DURCI DES BSAP-I OPTIMISÉS (PHASE III.2B)

Code de mélange	f _c			M.E	Flexion	KCL		Écaillage	Gel/dégel
	1J	28J	56J	56J	56J	28J	56J	perte de masse (g/m ²)	F.D. (%)
	MPa			GPa	MPa	Coulomb			
BSAPI-M1	14,2	51,8	52,8	35,4	4,8	736	436	177	103
BSAPI-M1B	14,0	51,7	52,4	37,7	4,7	830	494	294	99
BSAPI-M2	14,3	51,9	53,4	35,2	4,9	727	527	280	100
BSAPI-M3	5,1	31,0	32,6	30,3	4,8	1866	539	2611	*
BSAPI-M4	15,1	51,2	55,9	36,8	6,1	759	412	155	99
BSAPI-M5	14,7	52,1	52,9	37,1	7,1	575	386	302	101
BSAPI-M6	12,8	50,1	52,5	36,8	5,1	703	411	295	100

* Échantillon brisé

4.6.4 Viscosité plastique et seuil d'écoulement

Nous présentons au tableau 4.13 les résultats de seuil τ_0 et de viscosité η obtenus avec le rhéomètre ICAR pour les mélanges de BSAP-I préparés. En ce qui concerne la viscosité, on remarque une fluctuation entre 18,7 et 93,8 Pa.s, allant d'un niveau faible jusqu'à un niveau élevé de viscosité et dans le cas du seuil τ_0 entre 17 et 230 Pa, ces valeurs étant à la frontière d'un BAP et d'un BCV. Les BSAP-I possédant un rapport E/L de 0.40 ont conféré des valeurs de viscosité plus faibles par rapport à ceux obtenus pour les BSAP-I ayant un rapport E/L de 0,37. Dans le cas du seuil τ_0 , les BSAP-I possédant un rapport E/L de 0,37 ont conféré des valeurs plus faibles que celles obtenues possédant un rapport E/L de 0,40. Ces deux comportements expliquent le fait d'avoir trouvé presque dans tous les cas un bon équilibre entre la fluidité/stabilité sans avoir besoin d'ajouter un agent colloïdal. En plus, toutes les valeurs de seuil τ_0 et de viscosité η font parties de la bande rhéologique proposée au chapitre précédente, ce qui montre que cette bande proposée permet de conférer des BSAP-I performants au niveau rhéologique.

4.6.5 Thixotropie au repos

Les résultats des seuils de cisaillement statiques mesurés à 15, 30, 45 et 60 minutes pour les deux BSAP-I sont présentés dans la figure 4.33. Des seuils de cisaillement au repos entre 388 et 560 Pa à 15 minutes ce qui correspond aux taux d'augmentation du seuil entre 6,5 et 9,3 Pa / minute ont été obtenues pour les BSAP-I optimisés. Ces valeurs sont semblables à celles obtenus dans la phase III.1 lorsque nous avons validé des BSAP-I à l'usine. En prenant en compte l'échelle de classement des indices de restructuration établie par [Omran, 2011] dans le tableau 3.9 (seuil : 200 – 550 Pa et taux d'augmentation de 0 à 25 Pa / min) nous pouvons classer ces bétons ayant un faible indice de thixotropie. En termes de performance au niveau de comportement thixotropique, le BSAP-I contenant des rapports E/L de 0,37 et S/G de 0,50 ainsi qu'une teneur en liant de 400 kg/m³ (BSAP-IEPM5) est désigné.

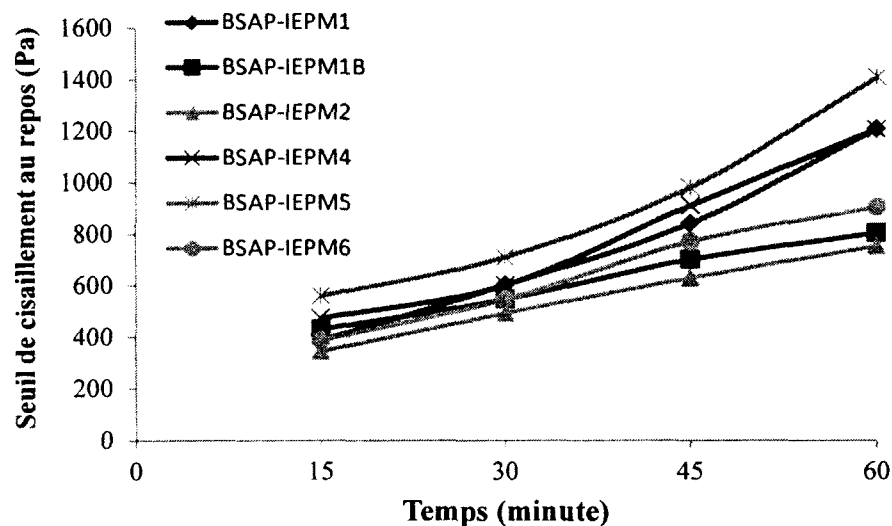


Figure 4.33 Comportement thixotropique au repos des BSAP-I optimisés (Phase III.2B)

4.6.6 Ségrégation statique

Nous présentons dans le tableau 4.13 les résultats des indices de ségrégation statique et des coefficients de variation (COV) pour les BSAP-I optimisés qui ont été évalués en utilisant la colonne de ségrégation. Presque la totalité des cas (excluant le BSAP-IM6), on remarque

des indices de ségrégation qui sont au-dessous du seuil de 15% établi pour la bonne conception d'un BAP au niveau de stabilité statique [Hwang et coll., 2006]. On remarque des coefficients de variation acceptables, étant dans la majorité des cas au-dessous du seuil de 3%. Dans le cas du BSAP-IEPM6 ayant un rapport E/L de 0,37 et S/G de 0,50, il existe un niveau de ségrégation au-dessus du seuil de 15% (18%). Ceci est associé à l'apparition de la mousse dans le béton, tel qu'expliqué dans la section 4.6.2.

4.6.7 Résistance à la compression

En ce qui concerne la résistance à la compression des BSAP-I optimisés, on remarque dans la figure 4.34 des niveaux de résistances aux différents âges très semblables par rapport à ceux obtenus dans la phase précédente. Dans le cas du béton BSAP-IEPM3, tel qu'expliqué dans la section 4.6.2, à cause de l'apparition de mousse dans la surface du béton. Une couche faible a été formée dans la surface des échantillons, ce qui a créé la formation d'une section de qualité plus faible par rapport au reste de la matrice du béton, ce qui a occasionné une réduction significative de la résistance à la compression de 10MPa à 1 jour et de 20 MPa à 28 et 56 jours par rapport aux valeurs usuellement obtenues. Des niveaux de résistances très semblables ont été obtenus pour les BSAP-I préparés avec les deux liants utilisés.

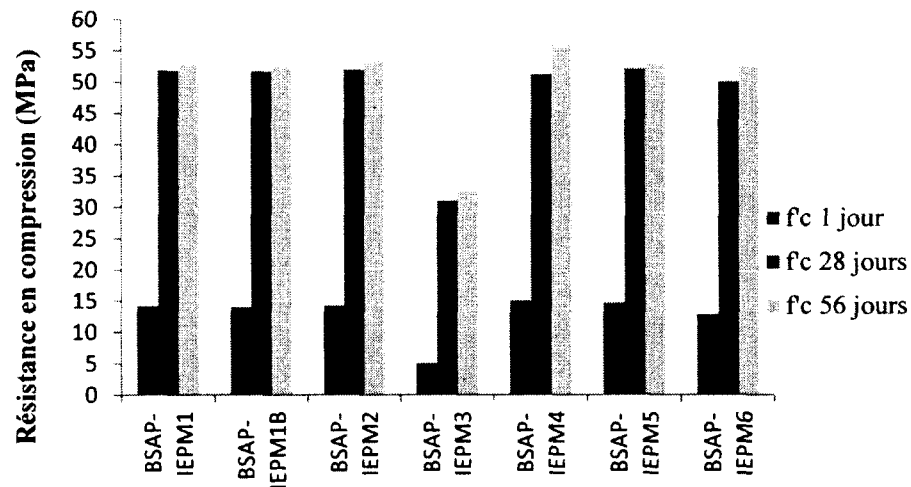


Figure 4.34 Résultats de résistance des cylindres de BSAP-I optimisés (Phase III.2B)

4.6.8 Module d'élasticité

Les résultats de module d'élasticité (M.E) des BSAP-I optimisés sont consignés au tableau 4.13. Des valeurs de M.E entre 30 et 38 GPa ont été obtenues à 56 jours. À partir des résultats du module d'élasticité et des résistances en compression obtenues aussi à 56 jours, nous avons trouvé une bonne corrélation entre ces valeurs et celles prédites, tels que illustré dans la figure 4.35, lorsque nous utilisons l'équation 4.1 ($EC = 9 (f_c)^{1/3}$) du code Européen 90-95 pour estimer le module d'élasticité d'un béton.

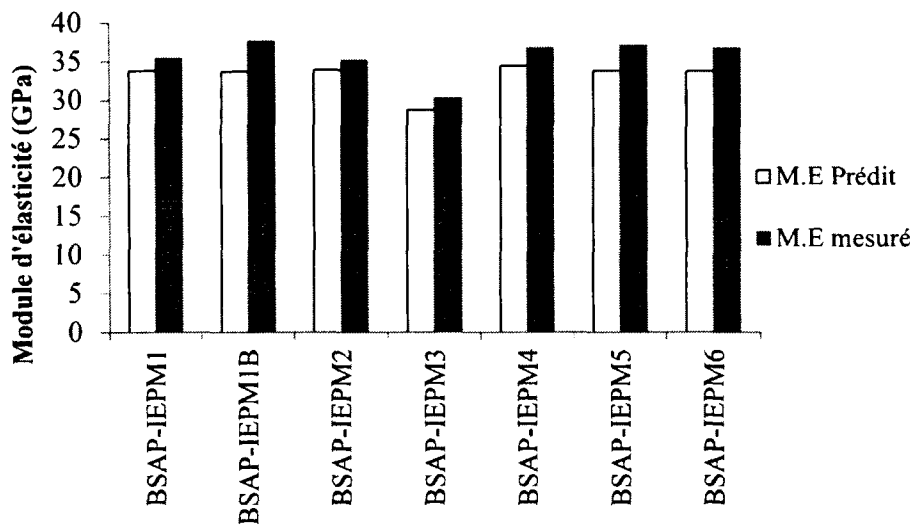


Figure 4.35 Résultats de module d'élasticité es BSAP-I (Phase III.2B)

4.6.9 Résistance à l'écaillage

À partir des résultats présentés dans le tableau 4.13, on remarque que les pertes de masse après 56 cycles de gel/dégel obtenues sur les échantillons exposés à l'écaillage, elles sont fluctuantes entre 200 et 300 g/m² pour les BSAP-I optimisés. Ces valeurs sont inférieures à la limite maximale de 500 g/m² spécifiée par la norme BNQ 2621-900. Dans le cas du BSAP-IM3, à cause de la présence significative de mousse et de la formation d'une surface très faible, il n'a pas été possible de réaliser cet essai pour ce béton.

4.6.10 Pénétrabilité aux ions chlore

Nous présentons dans la figure 4.36 les résultats des perméabilités aux ions chlores pour les BSAP-I optimisés. À partir de charges électriques obtenues, on remarque des valeurs de charge électrique entre 575 et 1866 coulombs à 28 jours et entre 386 et 589 coulombs à 56 jours. Excluant le résultat à 28 jours du BSAP-IEPM3 (1866 coulombs), on peut remarquer qu'un niveau très faible de charge électrique aux âges de 28 et 56 jours ont été conférés grâce à l'utilisation des ciments ternaires, étant qualifié ces valeurs de charge par la norme ASTM C1202 comme un béton possédant un niveau de pénétrabilité très négligeable (tableau 3.13). Dans le cas du BSAP-IEPM3, même si ce béton a présenté un problème de formation de mousse dans la surface des échantillons prélevés, à 28 jours un niveau de charge électrique de 1866 coulomb a été obtenu tandis qu'à 56 jours cette valeur a été réduite plus que trois fois (539 coulomb). Ce comportement peut être associé à la réduction significative de la porosité occasionnée par les ajouts du laitier et de la fumée de silice faisant partie du ciment utilisé (ciment GUB S/SF). Ceci montre davantage que l'apparition de la mousse dans le béton a affecté seulement sa qualité de surface et des propriétés associées (Tel que la résistance à l'écaillage) mais que nous pouvons quand même l'utiliser si nous améliorons la compatibilité ajout /SP-PCE à l'état frais pour disparaître la formation de mousse au béton.

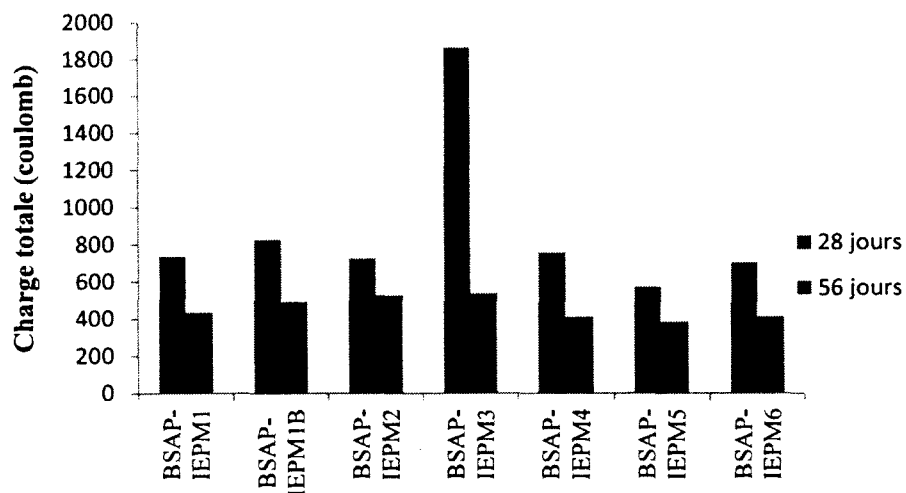


Figure 4.36 Pénétrabilité des ions chlores des BSAP-I optimisés (Phase III.2B)

4.6.11 Durabilité aux cycles gel / dégel rapides

Dans tous les cas, les BSAP-I ont conféré une bonne durabilité au gel/dégel, tel que présenté dans le tableau 4.13. On remarque que ces valeurs obtenues sont largement supérieures à 60%, ceci étant le minimum recommandé par la norme ASTM C666.

4.6.12 Retrait par séchage

Les résultats de retrait par séchage des BSAP-I sont illustrés dans la figure 4.37. Jusqu'à l'âge de 56 jours mesuré, on remarque des niveaux faibles de retrait par séchage dans le temps par rapport à ceux obtenus usuellement pour un béton conventionnel (retrait d'un BCV entre 400 et 800×10^{-6}). Dans tous les cas les BSAP-I ont conféré un niveau de retrait entre 300 et 450×10^{-6} . Ce comportement est dû au remplacement d'une partie du ciment par les ajouts tels que les cendres volantes et la fumée de silice dans le cas du ciment GUB F/SF et du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice dans le cas du ciment GUB S/SF.

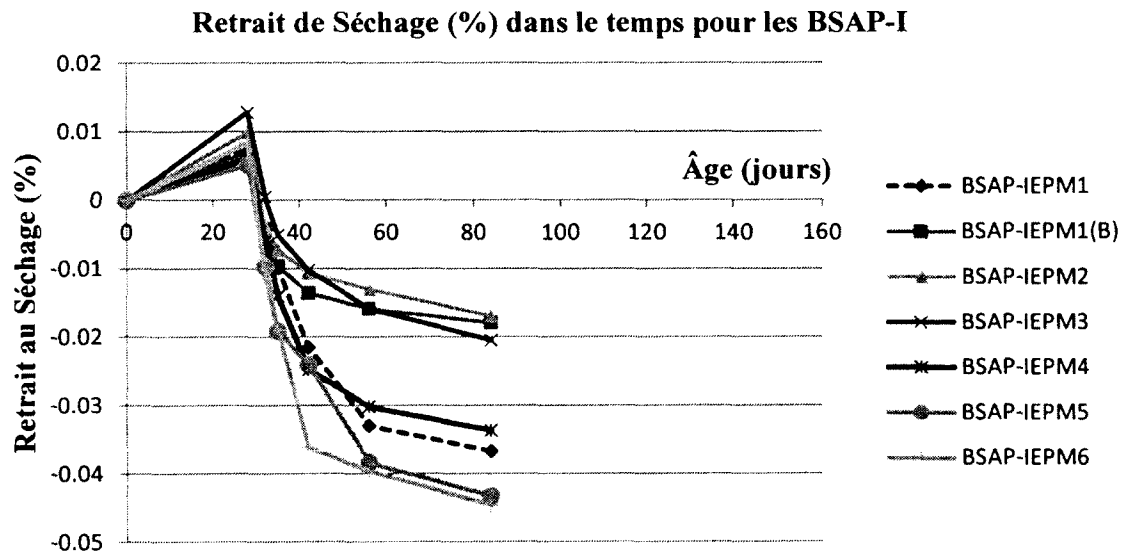


Figure 4.37 Retrait par séchage des BSAP-I optimisés (Phase III.2B)

4.6.13 Résistance en flexion

La résistance en flexion mesurée à 56 jours pour chaque mélange de BSAP-I optimisé est présentée sur la figure 4.38. Ces résultats démontrent des valeurs entre 4,7 et 7,1 MPa à 56 jours. Les résultats de la flexion peuvent être corrélés avec ceux obtenus dans la compression lorsque nous utilisons l'équation établie par le code [ACI 363-84]. Les valeurs théoriques obtenues par cette relation sont illustrées sur la figure 4.38, celles-ci étant proches des résultats mesurés à partir des prismes de BSAP-I prélevés pour les mélanges optimisés qui ont été préparés.

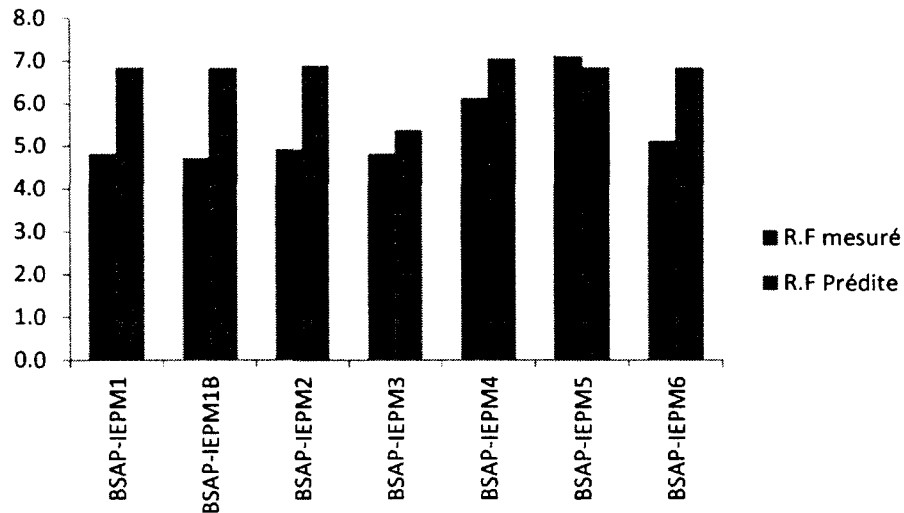


Figure 4.38 Résistance en flexion des BSAP-I optimisés (Phase III.2B)

Chapitre 5

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif général de ce projet de recherche vise la conception d'une nouvelle gamme de béton semi-autoplaçant à rhéologie adaptée pour des infrastructures (BSAP-I) exigeant une vibration minimale. Dans une première phase (Phase III.1), nous avons travaillé dans la mise en œuvre des essais préliminaires pour la caractérisation des BSAP-I à partir des protocoles d'essais et d'échantillonnage trouvés dans le projet de BSAP. Ces essais de caractérisation à l'état frais et durci ont été entrepris pour valider deux BSAP-I à l'usine, afin de choisir un béton optimal pour la mise en place des quatre piliers d'une infrastructure de pont à Sherbrooke. Dans une deuxième phase (Phase III.2), nous avons utilisé la technique du plan d'expériences pour étudier l'effet de trois paramètres E/L, S/G et teneur en liant sur les propriétés à l'état frais et durci des BSAP-I pour trouver des mélanges optimaux. Finalement, à partir de ces BSAP-I optimaux, nous avons fait la caractérisation des propriétés rhéologiques à l'état frais et des propriétés mécaniques à l'état durci ainsi que la durabilité, afin de trouver un équilibre optimal entre la maniabilité et le coût initial d'un BSAP-I, pour le conférer une bonne performance structurale et économique.

À la lumière des résultats de cette étude, nous retenons qu'il est possible de concevoir des BSAP-I ayant une vibration minimale pour la mise en place des infrastructures.

- Faisabilité des Protocoles

Il a été possible de caractériser adéquatement les propriétés rhéologiques à l'état frais et les résistances mécaniques à l'état durci des deux BSAP-I validés à l'usine, en utilisant les protocoles d'essai et d'échantillonnage d'un BSAP. Dans le cas de l'essai de capacité de remplissage d'un BSAP-I, la méthode adaptée pour l'essai L-Box avec 2 barres et un temps de vibration de 5 secondes utilisé ont permis de bien caractériser cette propriété pour BSAP-I pour un étalement fluctuant entre 500 ± 50 mm. En plus, l'application d'un nombre de pilonnage entre 5 et 8 coups/l couche peut être considéré pour l'échantillonnage des éprouvettes de BSAP-I. Ceci a permis d'obtenir des résultats f_c

très semblables lorsque nous avons une application de 10 coups/l couche considérée dans le protocole de BSAP.

- BSAP-I optimal au chantier

Un BASP-I ayant un MSA de 14 mm a été conçu de manière acceptable pour la mise en place des piliers d'une infrastructure de pont en conférant un bon équilibre entre sa fluidité et sa stabilité à l'usine, ainsi que des propriétés de thixotropie favorables qui ont contribué à une réduction de 50% de la pression hydrostatique sur le coffrage au chantier.

- Plan d'expériences

L'utilisation d'un plan factoriel à trois paramètres à deux niveaux 2^3 nous a permis d'obtenir des modèles statistiques fiables capables de prédire les résultats des propriétés rhéologiques à l'état frais et des résistances en compression à l'état durci pour l'optimisation de mélanges de BSAP-I ayant des rapport E/L entre 0,34 à 0,40, S/G entre 0,47 à 0,53 et teneur en liant entre 370 et 420 kg/m³.

L'exploitation des modèles établis en utilisant les courbes iso-réponses montre l'influence du rapport E/L dans presque la totalité des propriétés rhéologiques et des résistances mécaniques, étant les valeurs optimales entre 0,37 et 0,40 pour la conception des BSAP-I ayant des dosages minimales en SP, des temps d'écoulement les plus adéquates (au centre des limites d'un T50 de BAP), des viscosités moyennes, des capacités de remplissages les plus élevées et des résistances acceptables, en accomplissant les devis techniques des partenaires de la chaire industrielle (Tableau 2.4).

- Analyse coût / performance

Les mélanges contenant des rapports : E/C = 0,40, S/G = 0,47 et liant 370 kg/m³ dans le premier cas et E/C = 0,40, S/G = 0,50 et liant 400 kg/m³ démontre une meilleur performance à l'état frais et durci et ils ont été choisi pour réaliser une étude paramétrique et la caractérisation complète des propriétés frais et durci au laboratoire.

- Rhéologie des BSAP-I

Une bande rhéologique a été établie pour la conception optimale des BSAP-I ayant une vibration minimale. Ceci avec un seuil de cisaillement jusqu'à 230 Pa et une viscosité caractérise pour un niveau faible fluctuant entre 10 et 50 Pa.s et un niveau moyen entre 50 et 80 Pa.s pour conférer aux BSAP-I des bonnes performances rhéologiques.

Une bonne corrélation entre les temps d'écoulement T_{40} et T_{400} a été trouvée pour les BSAP-I étudiés. Ces temps ont varié entre 2 et 7 secondes, de la même façon que pour un T_{50} d'un BAP.

- Étude paramétrique des BSAP-I optimisés

Lorsque nous avons utilisé un ciment ternaire contenant du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice (GUb S/SF) les demandes en SP et AEA sont respectivement inférieures d'environ 20 et 10 ml/100kg de ciment par rapport à l'utilisation d'un ciment contenant de la cendre volante et de la fumée de silice (GUb F/SF).

L'utilisation d'un adjuvant SP-PEC pour la fabrication d'un BSAP-I à air entrainé (5 à 8%) ayant des rapports E/L de 0,37 et S/G de 0,50, ainsi qu'une teneur en liant de 400 kg/m³ permet d'avoir une réduction de 48% du dosage utilisé dans le cas d'un SP-PNS. Cet adjuvant permet aussi une réduction de 40% du dosage d'AEA utilisé pour entrainer de l'air au BSAP-I dans le cas d'une même formulation de béton.

L'utilisation d'une teneur en pâte de l'ordre de 342 l/m³ ou moins peut occasionner la présence significative d'une couche de mousse et l'incorporation d'une teneur en air significative dans le BSAP-I, lorsque un adjuvant SP-PCE et des rapports E/L de 0.40 et S/G de 0,47 sont utilisés.

Des propriétés rhéologiques semblables en termes d'étalement, J-Ring, capacité de remplissage et ségrégation statique sont obtenus lorsque nous utilisons pour une même formulation soit le ciment ternaire GUb F/SF ou GUb S/SF, présentant une légère réduction des demandes de SP et AEA, lorsque nous utilisons le ciment GUb S/SF.

- Propriétés mécaniques des BSAP-I optimisés

Des niveaux de résistances aux âges de 1, 28 et 56 jour très semblables ont été obtenus par rapport à ceux obtenus dans la phase de III.2A.

Des valeurs de Module d'élasticité entre 30 et 38 GPa ont été obtenues à 56 jours pour les BSAP-I préparés ayants des rapports E/L de 0,37 et 0,40 et des teneurs en ciments respectivement de 370 et 400kg/m³. En plus, des valeurs de résistance en flexion entre 4,7 et 7,1 MPa à 56 jours ont été obtenues pour ces mêmes rapports. Ces deux propriétés ont montré une bonne corrélation lorsque nous utilisons respectivement les équations du code européen 90-95 et celui du code ACI 363-84 pour prédire leurs résistances à l'âge de 56 jours.

- Durabilité des BSAP-I optimisés

En ce qui concerne la durabilité, des très bonnes performances ont été obtenues pour les BSAP-I optimisés contenant des ciments ternaires GUb F/SF et GUb S/SF en face aux attaques de gel/dégel, d'écaillage, de pénétration des ions chlorés et de fissuration par retrait de séchage dans le temps.

Des pertes de masse entre 200 et 300 g/m² après 56 cycles de gel/dégel sur les échantillons exposés à l'écaillage ont été obtenues, étant ces valeurs dans tous les cas inférieures à la limite maximale de 500 g/m² spécifiée par la norme BNQ 2621-900.

Des valeurs de charge électrique entre 575 et 1866 Coulombs à 28 jours et entre 386 et 589 Coulombs à 56 jours ont été obtenues. On remarque une réduction significative de charge électrique à 56 jours par rapport à 28 jours, ceci grâce à l'utilisation des ciments ternaires, ce qui permet de qualifier les BSAP-I par la norme ASTM C1202 comme des bétons possédant un niveau de pénétrabilité très négligeable.

Un niveau de retrait par séchage fluctuant entre 300 et 400 x 10⁻⁶ à l'âge de 84 jours suite à la fabrication des BSAP-I optimisés, a été obtenu.

Afin de favoriser l'utilisation du BSAP-I pour la mise en place des infrastructures, nous recommandons que cette étude pourra être complétée par :

- Une étude approfondie sur l'utilisation de SP-PCE avec un matrice de liants ternaires afin d'optimiser la compatibilité ajout/adjuvant à l'état frais pour conférer une meilleure performance que celle obtenue initialement dans notre étude avec un liant contenant du laitier et de la fumée de silice.
- Une étude approfondie permettant d'évaluer le comportement au niveau de retrait endogène des BSAP-I ayant des rapports E/L au-dessous de 0,40, afin de minimiser l'apparition des fissures après la coulée de ce béton.

6 BIBLIOGRAPHIE

ACI (2007). ACI 237.R-07. Self-consolidating concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, Michigan, United States, p. 1-30

ACI (2005). ACI 309.R-05. Guide for consolidation of concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, Michigan, United States, p. 1-36.

ACI (2008). ACI 309.1R-08. Report on behavior of fresh concrete during vibration, ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, Michigan, United States, p. 1-18

ACI (1998) ACI 309.2R-98. Identification and control of visible effects of consolidation on formed concrete surfaces, ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, Michigan, United States, 11p.

Aïtcin, P.-C., & Mindess S. (2011) Sustainability of Concrete. ISBN10 0415571960, 328 p.

Aïtcin, P.-C (2007) Binders for Durable and Sustainable Concrete. ISBN 13: 9780415385886, 528 p.

Assaad, J., & Khayat, K. H. (2004). Assessment of thixotropy of self-consolidating concrete and Concrete-Equivalent-Mortar - Effect of Binder Composition and Content. ACI Materials Journal, 101(5), 400-408.

Assaad, J., Khayat, K. H., & Mesbah, H. (2003). Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. ACI Materials Journal, 100(2), 99-107.

Assaad, J., & Khayat, K. H. (2005). Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self consolidating concrete, ACI Materials Journal, 102(3), 145-153.

Assaad, J., & Khayat, K. H. (2006). Effect of viscosity-enhancing admixtures on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete. ACI Materials Journal, 103(2), 280-287.

Assaad, J., & Khayat, K. H. (2005). Formwork pressure of self consolidating concrete made with various binder types and contents. ACI Materials Journal, 102(2), p. 215-223.

Assaad, J., Khayat, K. H., & Mesbah, H. (2003). Variation of formwork pressure with thixotropy of self consolidating concrete. ACI Materials Journal, 100(2), p. 29-37

[14] Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. (1989) An introduction to rheology, Amsterdam, Elsevier.

CAN (2006) CAN/CSA-S6-06 Qualité du béton, Code sur le calcul des ponts routiers, Canada, 820p.

Cement Concrete Aggregates Australia (2010), Sustainable Concrete Infrastructure, p 1-4.

Elwood, L. & Straughan J.J (1968) Effect of cement hydration on concrete form pressure. ACI journal, Proceeding V. 65, N°2, p 111-120.

Ferraris, C. & Hackley, V. (2001) Guide to rheological nomenclature: Measurement in ceramic particulate systems. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 946, p. 1-29.

Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 104(5), p. 461-478.

Ferraris, C.-F. et de Larrard F., (1998) "Testing and modelling of fresh concrete rheology", National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6094, p. 1-59.

Ferraris, C. (2000) Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. NISTIR 6819, Nantes, France, 66p.

Forsblad, L. & Sallstrom, S. (1996) Concrete Vibration - What's Adequate? Concrete International, V. 17, No. 9, September 1995, pp. 42-48.

G. H. Tattersall (1976) The workability of concrete, A view point Publication, PCA.

Gagné, R. (2011) Dégradation et vieillissement des ouvrages d'art : défis et perspectives, 79e Congrès l'ACFAS, Sherbrooke, 9-13 mai 2011.

Gardner, N. J. & Ho, P.T (1980) Pressure of concrete against formwork. ACI Journal, Proceeding V. 77, N°4, p 279-286.

Gardner, N. J. And Ho, P.T (1979) Lateral pressure of fresh concrete. ACI Journal, Proceeding V. 76, N°7, p 809-820.

Ghezal, A & Khayat, K. H. (2002) Optimizing Self-Consolidating Concrete with Limestone Filler by using Statistical Factorial Design Methods. ACI Materials Journal, 99(3), 264-272.

Gjørsv, O.E. (2010) Durability Design and Quality Assurance of Concrete Infrastructure. Concrete International, V. 30. N°09, p. 53-55.

Hilali A. (2009) Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autonplaçants : influence des fines calcaires et de fibres végétales, École doctoral sciences et ingénierie, Université de Cergy-Pontoise, France, 179p.

Holsen, R. H & al. (1974) Lateral pressures of concrete formwork. ACI journal, Proceeding V. 71, N°2, p 358-361

Huang N. (2006) Rhéologie des pâtes granulaires. Thèse de Doctorat, L'École Normale Supérieure de l'Université de Paris, France, 130p.

Khayat, K. H., and Aïtcin, P.-C., (1998), "Use of Self-Consolidating Concrete in Canada—Present Situation and Perspectives," Proceedings of the Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi, Japan.

Khayat, K. H., and Morin, R., (2002), "Performance of Self-Consolidating Concrete Used to Repair Parapet Wall in Montreal," Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of SCC, ACBM, Chicago, Ill., Nov. 12-13.

Khayat K., Yahia A., Kemal E. (2009) Correlating rheology of self-consolidating concrete to corresponding concrete-equivalent mortar. *ACI Materials Journal*, 106(19), 154-160.

Khayat K. Ballivy G., et Gaudreault H. (1999) High-performance cement grout for underwater crack injection. *Canadian journal of civil engineering*, vol. 24, page 405-418.

Khayat, K. H. & Assaad, J. (2003) Use of Thixotropy enhancing agent to reduce formwork pressure exerted by self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 105(3), 88-96.

Khayat, K. H., Saric-Coric, M., & Liotta, F. (2002). Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concrete. *ACI Materials Journal*, 99(3), 234-241.

Khayat, K. H., Ghezal, A., & Beaupré, D. (2002) Effect of High-Range Water-Reduced – Viscosity-Modifiand Admixture Combination on Rheological Properties of Concrete Equivalent Mortar. First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, p. 159-165.

Khayat, K. H. (2011) Notes du cours technologie avancée du béton GCI 711, Université de Sherbrooke, Québec, Canada. 300p.

Leclerc, A. (2010) Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-autoplaçants pour le bâtiment. Mémoire de maîtrise, Faculté de Génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 155p.

Laurent, J. (2002) Ressuage des bétons hydrauliques. Thèse de Doctorat, L'École Nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 209p.

MTQ (2007) MTQ-2101-07. Qualité du béton pour les ouvrages d'art. Tome VII, Ministère du transport du Québec. Québec, Canada, p. 2-5.

Mikanovic & coll., (2010) Workability Characteristic and Performance Criteria for Design and Control of Super Workable Concrete. 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Québec, Canada, p. 527-538.

Miura, N.; Takeda, N.; Chikamatsu, R.; Sogo, S. (1994) Application of Super Workable Concrete to Reinforced Concrete Structures with Difficult Construction Conditions, ACI. SP 140, p. 163-186.

Nagataki, Sh. & coll. (2010) State of the Art Report on SCC in Japan. 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Québec, Canada, p. 7-23.

Okamura, H & coll. (1999) Self-Compacting Concrete Development, Present Use and Future. First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete. pp. 3-14

Ouchi, M., Nakamura, S., Osterson, T. & Hallberg, S-E. (2003) Application on Self Compacting Concrete in Japan, Europa and United States ISHP.

Ozawa, K.; Maekawa, K.; Kunishima, M.; and Okamura, H., (1989) "Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures," Proceedings of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Chiang Mai, Thailand, V. 1, pp. 445-450.

Okamura, H., "Self-Compacting High-Performance Concrete," Concrete International, V. 19, No. 7, July 1997, pp. 50-54

P. F. G. Banfill, (1991) Rheology of Fresh Cement and Concrete, E & FN Spon, London.

Pekmezci, B. Y., Voigt, T., Kejin, W., & Shah, S. P. (2005). Self-Consolidating Concrete Applications for Slip-Form Paving: Phase I (Feasibility Study). Iowa State University, p. 8-72.

Roussel, N. (2008) Thixotropie des bétons modernes: Modélisation et application. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 1-9.

Roussel, N. & Ovarlez, G. (2005) A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. 8p.

Rupnow, T. D., Wang, K., & Schaefer, V. R. (2008). Effect of sampling location on the air void analyzer test results on concrete pavements: Evaluation of data from a 16 state-pooled fund project. Journal of Testing and Evaluation, 36(4), 1-13.

S. Naji, (2009) Développement d'essais pour évaluer la thixotropie et la robustesse des bétons autoplaçants", Mémoire de maitrise en sciences appliquées, spécialité Génie civil, Université de Sherbrooke, Québec. 200p.

Serran T., (1999) Rhéologie et rhéométrie des bétons. Applications aux bétons autonivelants. Thèse de doctorat, L'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 220 p.

Tanaka, K. (1993) Development and Utilization of High-Performance Concrete for the Construction of the Akashi Kaikyo Bridge,” Proceedings, High-Performance Concrete in Severe Environments, SP-140, P. Zia, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 25-51.

Tymkowicz, S., & Steffes, R. F. (1996). Vibration study for consolidation of portland cement concrete. Transportation Research Record, (1574), 109-115.

Turcry, P. (2004) Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, Université de Nantes, France.

Yahia, A. (1997) Rhéologie et performance des coulis de ciment destinés à la consolidation structurale d’ouvrages submergés, Thèse de doctorat des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 273 p.

Yamine J. (2009) Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques. Thèse de Doctorat, L’École Normale Supérieure de Cachan, Paris, France, 243 p.

Wallevik O. H. (2009) Introduction to Rheology of Fresh Concrete. ICI Rheocenter Course 17th-18th August, Reykjavik, Iceland, 200p.

Walz, K., (1960), Vibrated Concrete (Ruttelbeton), 3rd Edition, Wilhelm Ernst and Son, Berlin, 147 pp.