

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]



UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Facultés de génie
Département de génie civil

OPTIMISATION DE L'ADJUVANTATION DES BÉTONS FABRIQUÉS AVEC DE
L'EAU RECYCLÉE TRAITÉE

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Composition du jury :
M. Richard Gagné
M. Guillaume Lemieux
M. Arezki Tagnit-Hamou
M. Patrice Rivard

Sophie MOFFATT-BERGERON

Sherbrooke (Québec), Canada

Juillet 2009

IV-1979



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: 978-0-494-53411-3
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-53411-3

NOTICE:

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

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

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.

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.

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

Afin de s'inscrire dans un contexte de développement durable, l'industrie du béton prêt à l'emploi s'intéresse à la technologie propre qui permet de réincorporer de l'eau recyclée traitée dans de nouvelles gâchées de béton. Dans l'industrie du béton, les deux principales sources d'eau recyclée traitée sont les eaux de lavage des camions et les eaux utilisées pour recycler les bétons frais retournés à l'usine. Ces eaux recyclées traitées contiennent une grande quantité de matières solides en suspension et sont fortement alcalines ($\text{pH} > 12$).

Une première phase de recherche a permis de comprendre les mécanismes d'interaction entre l'eau recyclée traitée et certaines propriétés des bétons frais et durcis. La seconde phase de la recherche vise à optimiser l'adjuvantation des bétons afin de contrer les effets néfastes de l'eau recyclée traitée notamment sur l'affaissement, le temps de prise et l'entraînement d'air. Enfin, lors de la détermination des combinaisons d'adjuvants présentant les meilleurs résultats, des essais en usine permettent de valider les résultats obtenus en laboratoire.

Les résultats de cette recherche montrent que le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée traitée diminue considérablement l'affaissement, la teneur en air et le temps de prise du béton. Plus la proportion d'eau recyclée traitée est importante, plus les effets néfastes sont importants. Il a été démontré que les interactions les plus fortes découlent de la présence des matières solides en suspension dans l'eau recyclée traitée (effet physique plutôt que chimique). L'influence de l'eau recyclée sur le béton produit est fonction de la finesse des particules en suspension contenue dans l'eau de gâchage. Lorsque la teneur en solide en suspension est inférieure à 50 000 ppm, il est possible de compenser totalement les effets néfastes de l'eau recyclée en utilisant un retardateur de prise, et en augmentant les dosages en plastifiant (réducteur d'eau, superplastifiant) et en agent entraîneur d'air. Le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée s'inscrit dans le contexte de développement durable en revalorisant un de l'eau usée pour économiser de l'eau potable.

Mots clés : Béton, Adjuvant, Eau recyclée, Eau grise, Béton frais, Béton durci, Durabilité

REMERCIEMENTS

Les plus sincères remerciements vont à mon directeur de mémoire, monsieur Richard Gagné ing. Ph. D., pour son soutien, son implication et sa grande disponibilité tout au long de mes travaux de recherche. Travailler avec lui a été un véritable enrichissement tant sur le plan humain que professionnel.

Il est impossible de passer sous silence l'excellent travail des techniciens du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, messieurs Denis Bolduc, Dave Brindle, Claude Faucher, Jean-Yves Roy, Rajko Vojnovic et madame Ghislaine Luc. Leur implication et l'intérêt qu'ils ont porté au projet au cours des deux dernières années ont grandement contribué au bon déroulement de ma maîtrise.

Certains collègues de travail m'ont également soutenue et encouragée et ont ensoleillé mes journées passées à l'Université de Sherbrooke, monsieur Philippe Thivierge et madame Amélie Dansereau, tous deux étudiants à la maîtrise. Un merci spécial à madame Sophie Thomère, collègue de travail et amie, qui a travaillé très fort à la fabrication des bétons tout au long de son stage à l'Université de Sherbrooke. Merci également à madame Stéphanie Blanchard qui m'a transmis beaucoup de son savoir et qui a facilité la réalisation de ce mémoire.

Je remercie d'autant plus les partenaires industrielles sans qui le projet n'aurait pas été possible, Ciment St-Laurent, Demix Béton, Euclid Canada et Transport Québec, de même que le CRSNG pour son support financier.

Enfin, je remercie tous les membres du Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB) pour leurs conseils tout au long de la réalisation de mes travaux.

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Utilisation de l'eau recyclée traitée dans la fabrication du béton prêt à l'emploi | 1 |
| 1.1 | Introduction | 1 |
| 1.2 | Utilisation de l'eau dans le domaine du béton..... | 1 |
| 1.2.1 | Nécessité de recycler l'eau | 2 |
| 1.3 | Technique de récupération du béton et de l'eau recyclée..... | 3 |
| 1.3.1 | Méthode de récupération | 4 |
| 1.3.2 | Traitements biologiques et chimiques | 9 |
| 1.3.3 | Application du procédé à l'échelle mondiale | 10 |
| 1.4 | Composition chimique..... | 10 |
| 1.4.1 | Composition chimique..... | 11 |
| 1.4.2 | Les alcalis dans l'eau recyclée..... | 12 |
| 1.4.3 | Caractérisation physiques de l'eau recyclée | 13 |
| 1.4.4 | Âge de l'eau recyclée | 14 |
| 1.5 | Normes relatives à l'utilisation des eaux de lavage..... | 15 |
| 1.5.1 | Spécifications générales | 15 |
| 1.5.2 | Norme NQ | 16 |
| 1.5.3 | Norme CSA | 16 |
| 1.5.4 | Norme ASTM..... | 17 |
| 1.6 | Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton frais..... | 19 |
| 1.6.1 | Affaissement..... | 19 |
| 1.6.2 | Teneur en air..... | 20 |
| 1.6.3 | Temps de prise..... | 20 |
| 1.6.4 | Température..... | 22 |
| 1.6.5 | Masse volumique..... | 22 |
| 1.7 | Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton durci..... | 23 |
| 1.7.1 | Résistance à la compression | 23 |
| 1.7.2 | Résistance aux cycles de gel – dégel et à l'écaillage..... | 25 |
| 1.8 | Durabilité des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée traitée..... | 25 |
| 1.8.1 | Perméabilité..... | 26 |
| 1.8.2 | Résistance aux sulfates | 26 |
| 1.8.3 | Microfissuration | 26 |
| 1.8.4 | Retrait de séchage..... | 27 |
| 1.8.5 | Perméabilité aux ions chlorures..... | 27 |
| 1.8.6 | Corrosion | 28 |
| 1.9 | Viabilité du projet dans un contexte de développement durable..... | 28 |
| 2 | Objectifs de la recherche et programmes expérimentaux | 31 |
| 2.1 | Exposé de la problématique..... | 31 |
| 2.2 | Objectifs de la recherche | 32 |
| 2.3 | Partenaires de recherche | 33 |
| 2.4 | Dénomination et abréviations..... | 34 |
| 2.5 | Méthodologie appliquée | 35 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Matériaux, mélanges et procédures expérimentales | 39 |
| 3.1 | Granulats..... | 39 |
| 3.1.1 | Granulats grossiers | 39 |
| 3.1.2 | Granulats fins..... | 40 |
| 3.2 | Ciment | 42 |
| 3.3 | Eau recyclée..... | 44 |
| 3.4 | Adjuvants..... | 45 |
| 3.4.1 | Réducteurs d'eau | 45 |
| 3.4.2 | Retardateur de prise | 45 |
| 3.4.3 | Superplastifiants | 46 |
| 3.4.4 | Agent entraînement d'air | 46 |
| 3.5 | Formulation des mélanges..... | 47 |
| 3.5.1 | 25 MPa sans air entraîné..... | 48 |
| 3.5.1.1 | Bétons de laboratoire | 48 |
| 3.5.1.2 | Bétons d'usine | 50 |
| 3.5.2 | 25 MPa avec air entraîné..... | 50 |
| 3.5.2.1 | Béton de laboratoire..... | 50 |
| 3.5.3 | 30 MPa sans air entraîné..... | 53 |
| 3.5.3.1 | Bétons de laboratoire | 53 |
| 3.5.3.2 | Bétons d'usine | 54 |
| 3.5.4 | 35 MPa avec air entraîné | 54 |
| 3.5.4.1 | Bétons de laboratoire | 54 |
| 3.5.4.2 | Bétons d'usine | 55 |
| 3.6 | Rapport E / L | 56 |
| 3.7 | Séquence de malaxage en laboratoire..... | 57 |
| 3.8 | Déroulement des essais en usine | 59 |
| 3.9 | Description des tests et essais..... | 59 |
| 3.9.1 | Affaissement..... | 60 |
| 3.9.2 | Masse volumique..... | 61 |
| 3.9.3 | Teneur en air..... | 61 |
| 3.9.4 | Température..... | 62 |
| 3.9.5 | Stabilité du réseau de bulles d'air | 63 |
| 3.9.6 | Temps de prise initial | 64 |
| 3.9.7 | Résistance à la compression | 64 |
| 3.9.8 | Résistance aux cycles de gel – dégel | 65 |
| 3.9.9 | Résistance à l'écaillage..... | 66 |
| 3.9.10 | Rapport E / L – essai au micro-onde | 67 |
| 4 | Caractérisation de l'eau recyclée traitée | 68 |
| 4.1 | Eau recyclée utilisée en laboratoire | 68 |
| 4.2 | Eau recyclée utilisée en usine..... | 69 |
| 4.3 | Décantation de l'eau recyclée..... | 70 |
| 4.4 | Lavage au tamis 80 μm | 74 |
| 4.5 | Granulométrie laser | 76 |
| 4.6 | Granulométrie combinée des solides contenus dans l'eau recyclée traitée | 77 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Présentation des résultats | 78 |
| 5.1 | Essais préliminaires (série 1)..... | 78 |
| 5.2 | Bétons 25 MPa sans air entraîné | 90 |
| 5.2.1 | Essais en laboratoire | 90 |
| 5.2.2 | Essais en usine..... | 91 |
| 5.3 | Bétons 25 MPa avec air entraîné | 92 |
| 5.3.1 | Essais en laboratoire | 92 |
| 5.4 | Bétons 30 MPa sans air entraîné | 94 |
| 5.4.1 | Essais en laboratoire | 94 |
| 5.4.2 | Essais en usine..... | 95 |
| 5.5 | Bétons 35 MPa avec air entraîné | 96 |
| 5.5.1 | Essais en laboratoire | 96 |
| 5.5.2 | Essais en usine..... | 108 |
| | | |
| 6 | Analyse des résultats | 99 |
| 6.1 | Propriétés du béton frais en laboratoire..... | 99 |
| 6.1.1 | Affaissement..... | 99 |
| 6.1.1.1 | 25 MPa sans air entraîné..... | 99 |
| 6.1.1.2 | 25 MPa avec air entraîné | 102 |
| 6.1.1.3 | 30 MPa sans air entraîné..... | 106 |
| 6.1.1.4 | 35 MPa avec air entraîné..... | 108 |
| 6.1.2 | Teneur en air..... | 110 |
| 6.1.2.1 | 25 MPa avec air entraîné | 111 |
| 6.1.2.2 | 35 MPa avec air entraîné | 113 |
| 6.1.3 | Température..... | 114 |
| 6.1.4 | Stabilité du réseau de bulles d'air..... | 115 |
| 6.1.4.1 | 25 MPa avec air entraîné | 115 |
| 6.1.4.2 | 35 MPa avec air entraîné | 116 |
| 6.1.5 | Temps de prise..... | 118 |
| 6.1.5.1 | 25 MPa sans air entraîné..... | 118 |
| 6.1.5.2 | 25 MPa avec air entraîné | 119 |
| 6.1.5.3 | 30 MPa sans air entraîné..... | 122 |
| 6.1.5.4 | 35 MPa avec air entraîné | 123 |
| 6.1.6 | Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais en laboratoire..... | 124 |
| 6.2 | Propriétés du béton durci en laboratoire..... | 126 |
| 6.2.1 | Résistance à la compression | 126 |
| 6.2.1.1 | 25 MPa sans air entraîné..... | 126 |
| 6.2.1.2 | 25 MPa avec air entraîné | 128 |
| 6.2.1.3 | 30 MPa sans air entraîné..... | 131 |
| 6.2.1.4 | 35 MPa avec air entraîné | 132 |
| 6.2.2 | Résistance aux cycles de gel – dégel..... | 133 |
| 6.2.3 | Résistance à l'écaillage..... | 135 |
| 6.2.4 | Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons durcis en laboratoire..... | 136 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.3 | Propriétés du béton frais en usine..... | 137 |
| 6.3.1 | Affaissement..... | 138 |
| 6.3.1.1 | 25 MPa sans air entraîné..... | 138 |
| 6.3.1.2 | 30 MPa sans air entraîné..... | 139 |
| 6.3.1.3 | 35 MPa avec air entraîné..... | 141 |
| 6.3.2 | Teneur en air..... | 142 |
| 6.3.3 | Température..... | 145 |
| 6.3.4 | Stabilité du réseau de bulles d'air..... | 145 |
| 6.3.5 | Temps de prise initiale..... | 146 |
| 6.3.6 | Rapport E / L..... | 147 |
| 6.3.7 | Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais en usine..... | 148 |
| 6.4 | Propriétés du béton durci en usine..... | 149 |
| 6.4.1 | Résistance à la compression..... | 149 |
| 6.4.1.1 | 25 MPa sans air entraîné..... | 149 |
| 6.4.1.2 | 30 MPa sans air entraîné..... | 150 |
| 6.4.1.3 | 35 MPa avec air entraîné..... | 151 |
| 6.4.2 | Résistance aux cycles de gel – dégel..... | 152 |
| 6.4.2.1 | 35 MPa avec air entraîné..... | 152 |
| 6.4.3 | Résistance à l'écaillage..... | 154 |
| 6.4.3.1 | 35 MPa avec air entraîné..... | 154 |
| 6.4.4 | Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais en usine..... | 155 |
| | CONCLUSION | 156 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 158 |
| A | Fiche techniques des granulats..... | 161 |
| B | Exemple de calcul du temps de prise..... | 164 |
| C | Exemple de calcul de la résistance à la compression..... | 166 |
| D | Calcul du rapport E / L – Essai au micro-onde..... | 168 |
| E | Exemple de des proportions d'eau recyclée par mélange..... | 170 |
| F | Résistance aux cycles de gel – dégel des bétons fabriqués..... | 172 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------|--|-----|
| 1.1 | Méthode de récupération des eaux par bassins de décantation | 6 |
| 1.2 | Usines intégrant la méthode des bassins de décantation, États-Unis | 7 |
| 1.3 | Recycleur à béton typique | 8 |
| 1.4 | Recycleur d'eau avec bassin de récupération des eaux grises..... | 9 |
| 2.1 | Dénomination spécifique des mélanges | 35 |
| 2.2 | Répartition des essais en laboratoire et en usine | 36 |
| 2.3 | Identification de chaque mélange effectué en laboratoire | 37 |
| 2.4 | Identification de chaque mélange effectué en usine..... | 38 |
| 3.1 | Courbe granulométrique du granulat grossier et fuseau normalisé | 40 |
| 3.2 | Courbe granulométrique du granulat fin et fuseau normalisé | 42 |
| 4.1 | Densité de l'eau recyclée en fonction des solides en suspension (laboratoire) 69 | |
| 4.2 | Densité de l'eau recyclée en fonction des solides en suspension (usine)..... | 70 |
| 4.3 | Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 0 minute..... | 72 |
| 4.4 | Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 5 minutes..... | 72 |
| 4.5 | Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 2 heures | 73 |
| 4.6 | Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 24 heures | 73 |
| 4.7 | Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 120 heures | 74 |
| 4.8 | Courbe granulométrique des solides passant le tamis 80 μm | 76 |
| 5.1 | Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa sans air entraîné | 79 |
| 5.2 | Affaissement - 25 MPa sans air entraîné | 80 |
| 5.3 | Temps de prise initial - 25 MPa sans air entraîné..... | 81 |
| 5.4 | Résistance à la compression - 25 MPa sans air entraîné..... | 82 |
| 5.5 | Affaissement - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm..... | 84 |
| 5.6 | Affaissement - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm..... | 85 |
| 5.7 | Teneur en air - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm..... | 86 |
| 5.8 | Teneur en air - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm..... | 87 |
| 5.9 | Temps de prise initial - 25 MPa avec air entraîné | 88 |
| 5.10 | Résistance à la compression - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm | 89 |
| 5.11 | Résistance à la compression - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm | 89 |
| 6.1 | Affaissement à 10 minutes - 25 MPa sans air entraîné | 100 |
| 6.2 | Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa sans air entraîné..... | 101 |
| 6.3 | Affaissement à 10 minutes - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm..... | 102 |
| 6.4 | Affaissement à 10 minutes - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm..... | 103 |
| 6.5 | Variation de l'affaissement dans le temps- 25 MPa air entraîné, 50 000 ppm | 104 |
| 6.6 | Variation de l'affaissement dans le temps- 25 MPa air entraîné, 75 000 ppm | 105 |
| 6.7 | Affaissement à 10 minutes - 30 MPa sans air entraîné | 106 |
| 6.8 | Variation de l'affaissement dans le temps - 30 MPa sans air entraîné..... | 107 |
| 6.9 | Affaissement à 10 minutes - 35 MPa avec air entraîné..... | 108 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.10 | Variation de l'affaissement dans le temps - 35 MPa avec air entrainé..... | 110 |
| 6.11 | Évolution du volume d'air dans le temps - 25 MPa air entrainé, 50 000 ppm | 111 |
| 6.12 | Évolution du volume d'air dans le temps - 25 MPa air entrainé, 75 000 ppm | 112 |
| 6.13 | Évolution du volume d'air dans le temps - 35 MPa avec air entrainé..... | 113 |
| 6.14 | Temps de prise initial - 25 MPa sans air entrainé | 119 |
| 6.15 | Temps de prise initial - 25 MPa avec air entrainé, 50 000 ppm..... | 120 |
| 6.16 | Temps de prise initial - 25 MPa avec air entrainé, 75 000 ppm..... | 121 |
| 6.17 | Temps de prise initial - 30 MPa sans air entrainé | 122 |
| 6.18 | Temps de prise initial - 35 MPa avec air entrainé | 123 |
| 6.19 | Résistance à la compression - 25 MPa sans air entrainé | 127 |
| 6.20 | Résistance à la compression - 25 MPa avec air entrainé, 50 000 ppm..... | 128 |
| 6.21 | Résistance à la compression - 25 MPa avec air entrainé, 75 000 ppm..... | 130 |
| 6.22 | Résistance à la compression - 30 MPa sans air entrainé | 131 |
| 6.23 | Résistance à la compression - 35 MPa avec air entrainé..... | 132 |
| 6.24 | Résistance aux cycles de gel-dégel - 35 MPa avec air entrainé | 134 |
| 6.25 | Résistance à l'écaillage - 35 MPa avec air entrainé | 136 |
| 6.26 | Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa sans air entrainé..... | 138 |
| 6.27 | Variation de l'affaissement dans le temps - 30 MPa sans air entrainé..... | 140 |
| 6.28 | Variation de l'affaissement dans le temps - 35 MPa avec air entrainé..... | 141 |
| 6.29 | Évolution du volume d'air dans le temps - 35 MPa avec air entrainé..... | 144 |
| 6.30 | Comparaison des rapports E/C calculé (bavard) et E/C mesuré (micro-onde) | 148 |
| 6.31 | Résistance à la compression - 25 MPa sans air entrainé | 149 |
| 6.32 | Résistance à la compression - 30 MPa sans air entrainé | 150 |
| 6.33 | Résistance à la compression - 35 MPa avec air entrainé..... | 151 |
| 6.34 | Résistance aux cycles de gel-dégel - 35 MPa avec air entrainé | 153 |
| 6.35 | Résistance à l'écaillage - 35 MPa avec air entrainé | 154 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|------|---|-----|
| 1.1 | Comparaison entre quatre normes régissant l'utilisation de l'eau recyclée | 18 |
| 3.1 | Granulométrie du granulat grossier et fuseau normalisé | 39 |
| 3.2 | Granulométrie du granulat fin et fuseau normalisé | 41 |
| 3.3 | Composition chimique des ciments pour les essais en laboratoire..... | 43 |
| 3.4 | Composition minéralogique du ciment GU | 43 |
| 3.5 | Formulation des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 1 | 48 |
| 3.6 | Formulation des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 2 | 49 |
| 3.7 | Formulation des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 3 | 50 |
| 3.8 | Formulation des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 1 | 51 |
| 3.9 | Formulation des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 2 | 52 |
| 3.10 | Formulation des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 2 | 53 |
| 3.11 | Formulation des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 3 | 54 |
| 3.12 | Formulation des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 2 | 54 |
| 3.13 | Formulation des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 3 | 55 |
| 4.1 | Valeurs comparatives des temps de décantation de l'eau recyclée | 71 |
| 4.2 | Résultats du lavage au tamis 80 μm , comparaison de deux eaux recyclée | 75 |
| 5.1 | Résultats des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 1 | 79 |
| 5.2 | Résultats des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 1 | 83 |
| 5.3 | Résultats des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 2 | 91 |
| 5.4 | Résultats des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 3 | 92 |
| 5.5 | Résultats des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 2 | 93 |
| 5.6 | Résultats des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 2 | 95 |
| 5.7 | Résultats des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 3 | 95 |
| 5.8 | Résultats des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 2 | 97 |
| 5.9 | Résultats des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 3 | 98 |
| 6.1 | Réseau de bulles d'air — 25 MPa avec air entraîné | 115 |
| 6.2 | Réseau de bulles d'air — 35 MPa avec air entraîné (laboratoire)..... | 116 |
| 6.3 | Réseau de bulles d'air — 35 MPa avec air entraîné (usine)..... | 145 |
| 6.4 | Temps de prise initial des bétons fabriqués en usine..... | 146 |
| 6.5 | Comparaison des rapports E/L des bétons fabriqués en usine..... | 147 |

1. UTILISATION DE L'EAU RECYCLÉE TRAITÉE DANS LA FABRICATION DU BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

1.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les concepts de protection environnementale et de développement durable ont gagné en importance. Les sociétés industrialisées ont démontré les dangers potentiels qui pourraient survenir à l'échelle planétaire si aucun changement majeur n'était apporté dans les habitudes de vie des individus, mais surtout dans le mode de production des industries. Les producteurs de béton et les cimentiers ont pris au sérieux cette conscientisation générale quant à l'importance de se soucier de l'environnement.

Demix Béton, division de ciment St-Laurent, a innové en dotant d'un recycleur d'eau une de ses usines, située dans l'arrondissement de LaSalle de la Ville de Montréal. Cependant, le recycleur d'eau n'est pas présentement utilisé à sa capacité maximale. En effet, l'incorporation de l'eau recyclée traitée dans le béton peut faire varier les propriétés du béton frais et durci. Afin de rendre au béton contenant de l'eau recyclée les propriétés d'un mélange contenant uniquement de l'eau de l'aqueduc, certaines formulations d'adjuvants peuvent être utilisées. Ce mémoire portera donc sur l'optimisation de l'adjuvantation des bétons contenant de l'eau recyclée traitée. Pour ce faire, l'influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton doit d'abord être présentée.

1.2. Utilisation de l'eau dans le domaine du béton

La fabrication du béton contient une quantité non négligeable d'eau, variant généralement entre 120 L / m³ et 180 L / m³ de béton [Lindon 2005]. Cette eau assure l'hydratation du ciment et l'acquisition des propriétés du béton, et plusieurs spécialistes s'attardent à optimiser cette utilisation d'eau potable. Par ailleurs, peu de personnes sont conscientes de toute l'eau supplémentaire qui entre dans la fabrication d'un mètre cube de béton. Le lavage des

bétonnières et des usines de bétons consomme pratiquement autant d'eau par mètre cube de béton produit.

Deux études, l'une menée en Floride et la seconde en Slovénie, concluent qu'il faut environ 100 litres d'eau pour nettoyer l'équipement relatif à la production d'un mètre cube de béton [Chini, Muszynski et al. 2001-2002] ; [Selih, et al. 2003]. En d'autres mots, cela signifie qu'il faut entre 500 et 1 000 litres d'eau potable pour laver une bétonnière standard de 9 m³ [Borger, et al. 1994] ; [Sandrolini et Franzoni 2001]. Paolini et Khurana [1998] vont même jusqu'à mentionner 1 500 litres d'eau par bétonnière. Il faut dire qu'en moyenne, 275 kg de béton sont collés sur les parois des bétonnières lors de leur retour de livraison.

Au Texas, 16 millions de mètres cubes de béton sont produits annuellement. À ces 16 millions de mètres cubes sont associés 397 millions de litres d'eau potable pour le lavage des bétonnières. Ainsi, dans tous les États-Unis, 4,7 milliards de litres d'eau sont utilisés pour le nettoyage de l'équipement de fabrication des quelques 189 millions de mètres cubes produit annuellement [Borger, et al. 1994]. Il est à noter que les pays en voie de développement consomment davantage de béton que les pays industrialisés comme les États-Unis [Aïtcin 2003].

1.2.1. Nécessité de recycler l'eau

Ces statistiques permettent d'insister sur la nécessité d'économiser l'eau potable dans l'industrie du béton prêt à l'emploi. De plus, en rejetant ces eaux de lavages dans les égouts municipaux, leur nature extrêmement basique peut engendrer la détérioration du système, allant même jusqu'à la contamination de la nappe souterraine. Les normes ne permettent dorénavant plus le rejet de ces eaux considérant les nuisances que cela peut induire à l'équilibre des écosystèmes et à l'environnement [Sealey, et al. 2001]. Enfin, il devient plus dispendieux pour les producteurs de béton de disposer des eaux usées, au même moment où l'eau potable se fait plus rare [Lindon 2005] ; [Paolini et Khurana 1998].

L'idée d'utiliser différentes eaux à la place de l'eau potable dans le béton remonte à 1925, où Abrams avait effectué des essais sur des bétons fabriqués avec 68 échantillons d'eau différents. À ce moment, il avait conclu qu'une eau chargée à plus de 6 000 ppm n'était plus utilisable pour le gâchage du béton [Borger, et al. 1994]. Or, il n'avait pas testé l'eau de lavage des bétonnières, et avait comme seul critère la résistance à la compression à 28 jours. Malgré tout, cette étude démontre que la conscientisation à économiser l'eau potable remonte à près d'un siècle.

1.3. Techniques de récupération du béton et de l'eau recyclée

Pratiquement tout d'un mélange de béton est récupérable [Aïtcin 2008]. Les granulats grossiers sont séparés des granulats fins et ils sont tous deux lavés et tamisés afin d'être réincorporés dans un nouveau mélange. Il est également possible de faire des cubes avec le béton non utilisé pour ensuite concasser le béton durci et l'utiliser comme source de gros granulats. Enfin, le recyclage de l'eau et des particules de ciment est un sujet moins exploité et fera l'objet de ce mémoire.

L'*eau recyclée* est synonyme de plusieurs noms. Dans l'industrie du béton, il est principalement question des *eaux de lavage*, puisque cette eau provient du nettoyage de l'équipement et des bétonnières. Due à une quantité importante de particules de ciment en solution, l'eau recyclée est de couleur grisâtre, ce qui lui vaut également le nom d'*eau grise* [Gagné et Blanchard 2006]. Pour les termes anglophones, « sludge water », « grey water » et « wash water » sont souvent utilisés. Le terme « slurry » désigne davantage les boues récupérées dans le processus. À un niveau plus général, le terme « waste water » est également utilisé.

L'eau recyclée provient principalement de trois sources. Une première partie provient du lavage des bétonnières, qui sont nettoyées à l'aide de la pression d'un jet d'eau au retour de leur livraison de béton. Tel que mentionné précédemment, il faut compter entre 500 et 1 000 litres d'eau potable pour laver une bétonnière standard.

Il arrive parfois que le contenu d'une bétonnière ne soit pas utilisé sur le chantier, ou qu'il y ait des restes importants. En effet, il est souvent moins dispendieux et moins compliqué pour un entrepreneur de commander trop de béton que de commander exactement les quantités requises. Cela est compréhensible puisque lors d'une journée de coulée, les coûts reliés à l'interruption du chantier dû à un manque de béton sont très élevés. Environ 5 % du béton prêt à l'emploi produit est une perte puisqu'il sera refusé en chantier à cause de ses propriétés douteuses, ou simplement parce qu'il s'agit d'une commande de surplus à titre préventif [Inforbloc 2005].

Les installations de lavage, les lieux et les équipements des usines de production de béton doivent également être lavés à l'occasion. Bien que les usines de béton soient souvent poussiéreuses, il est important de limiter la saleté engendrée par la production afin d'éviter les bris ou l'usure prématuré des équipements. Cette source d'eau est cependant moins importante en termes de constance et de quantité que les deux précédentes.

1.3.1. Méthodes de récupération

Il existe différentes méthodes avec plusieurs variantes pour récupérer les eaux de lavage. Ces moyens modernes doivent être conçus en considérant le budget restreint que les producteurs de béton peuvent accorder au recyclage. Il faut également faire le nécessaire afin de minimiser les coûts d'entretien et d'allonger la durée de vie de l'équipement de recyclage instauré afin qu'il soit viable à long terme. Si le but principal des recycleurs est de minimiser les impacts concernant l'utilisation de l'eau, il est primordial que le système n'engendre pas d'autres nuisances environnementales. Enfin, il faut surtout prévoir des méthodes simples d'installation, d'utilisation et d'entretien puisque la main-d'œuvre sera limitée et risque de ne pas être familière avec les recycleurs d'eau [Vickers 2002].

Une première méthode de récupération consiste à recycler tout le béton restant dans la bétonnière. Cette technique est utilisée lorsqu'il s'agit de béton commandé en surplus ou lorsque les propriétés du béton n'ont pas été jugées satisfaisantes sur le chantier. Il s'agit de

conserver le béton dans le camion, et afin d'éviter la prise inévitable du béton, un agent stabilisateur est incorporé directement dans la bétonnière. Cela permet de conserver la fluidité du mélange et de le laisser en « période de dormance ». Plusieurs heures plus tard, un agent activateur est ajouté afin de réactiver les propriétés chimiques et liantes des composés [Borger, et al. 1994]. Ainsi, le dernier béton d'une journée de travail est conservé durant la nuit et sera mélangé au premier béton produit le lendemain. Cela n'engendre, en théorie, aucune perte si les stabilisateurs et activateurs fonctionnent bien. Il faut cependant s'assurer que la commande prévue le lendemain matin soit compatible avec le dernier mélange de la veille [Sealey, et al. 2001].

Une autre étude sur ce procédé menée au Royaume-Uni ajoute qu'il est même possible de conserver le béton jusqu'à 72 heures en camion, ce qui permet d'utiliser la technique même durant les fins de semaine [Paolini et Khurana 1998]. Les propriétés rhéologiques de ces bétons ne sont apparemment pas affectées et les essais de durabilité ont démontré de bons résultats. Cette méthode facilite également le transport sur de longues distances du béton.

Par contre, d'autres auteurs sont moins convaincus par cette innovation et admettent qu'il est difficile de bien mélanger les agents stabilisateurs et activateurs au béton. La répartition des ajouts n'étant pas parfaite, le béton ne présente plus des propriétés homogènes et risque d'être moins malléable par endroits [Lindon 2005]. Enfin, les conducteurs des bétonnières sont souvent responsables du contenu de leur bétonnière et ajoutent eux-mêmes les agents chimiques, de sorte qu'il est difficile d'avoir le contrôle sur les quantités incorporées [Barfoot 1989]. Il est à noter que cette étude relève des débuts de la méthode.

La seconde méthode de récupération est complètement différente de la première. Il s'agit de laisser décanter les eaux de lavages et de réutiliser la partie propre recueillie après décantation [Lindon 2005]. En général, l'eau traverse trois bassins de décantation et est ensuite récupérée pour être utilisée dans un nouveau mélange. La majorité des particules sont retenues dans le premier bassin de décantation, mais les deux autres sont nécessaires pour assurer une certaine purification de l'eau [Selih, et al. 2003]. La figure 1.1 présente le procédé développé au Royaume-Uni.

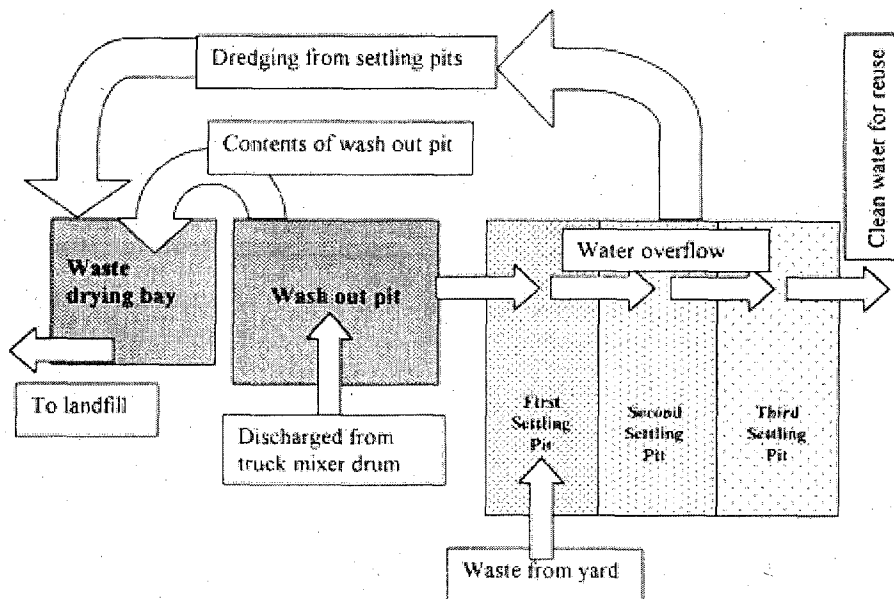


Figure 1.1 Méthode de récupération des eaux par bassins de décantation [Sealey, et al. 2001]

Cette technique a été popularisée en Allemagne où certains producteurs favorisent l'utilisation d'eau très propre dans leur mélange de béton. Une fois toutes les particules supérieures à 0,3 mm (0,25 mm dans certaines usines) récupérées par décantation, l'eau est entreposée dans un silo pour un traitement chimique. Il s'agit alors d'y ajouter un flocculant afin de pouvoir retirer les résidus d'adjuvant ou de coloration, de même que les particules de ciment en suspension. Ces rejets, récupérés sous forme de pâte, sont parfois réutilisés dans la fabrication de bétons non structuraux. L'eau récupérée après le traitement peut être réutilisée dans de nouveaux bétons, selon les limites du client, ou servira au nettoyage des bétonnières. Ainsi, toute l'eau de lavage est réutilisée [Bauma 1995] ; [Concrete engineering international 2004].

Cette même méthode existe également aux États-Unis, où parfois même les fines particules sont récupérées lors du premier bassin de décantation. Elles serviront par la suite à favoriser « l'effet filler ». Cependant, pour les grandes usines de production, les utilisateurs suggèrent l'installation de quatre bassins afin d'éviter les surcharges des bassins en période d'achalandage [Malisch 1996]. La figure 1.3 est composée de deux photos de recyclage de l'eau par décantation.

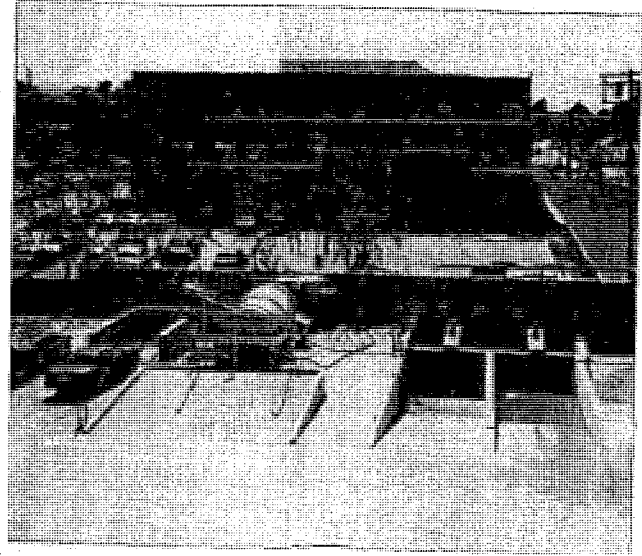
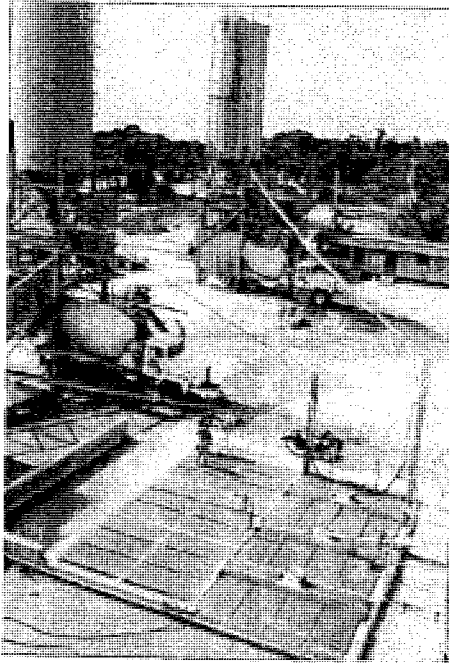


Figure 1.2 Usines intégrant la méthode des bassins de décantation, États-Unis [Malisch 1996]

L'inconvénient majeur de cette approche est qu'il faut disposer des résidus solides accumulés au fond des bassins. Ce problème sera discuté plus longuement dans la section 1.9 portant sur le développement durable. De plus, même après le passage dans trois bassins de décantation, l'eau nécessite plusieurs traitements chimiques afin de la purifier et de la neutraliser davantage.

La méthode de récupération qui fera l'objet de cet essai consiste à recycler l'eau par le biais d'un recycleur muni d'une vis sans fin, qui sert à remonter les granulats, fins et grossiers, et à laisser retomber l'eau grise dans des bassins prévus à cet effet. Une photo de ce type de recycleur est présentée à la figure 1.4.

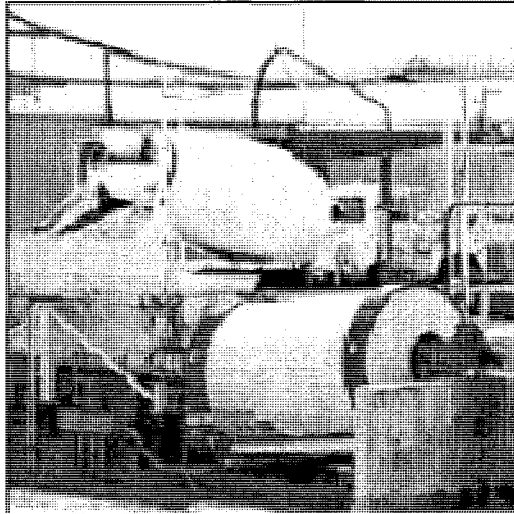
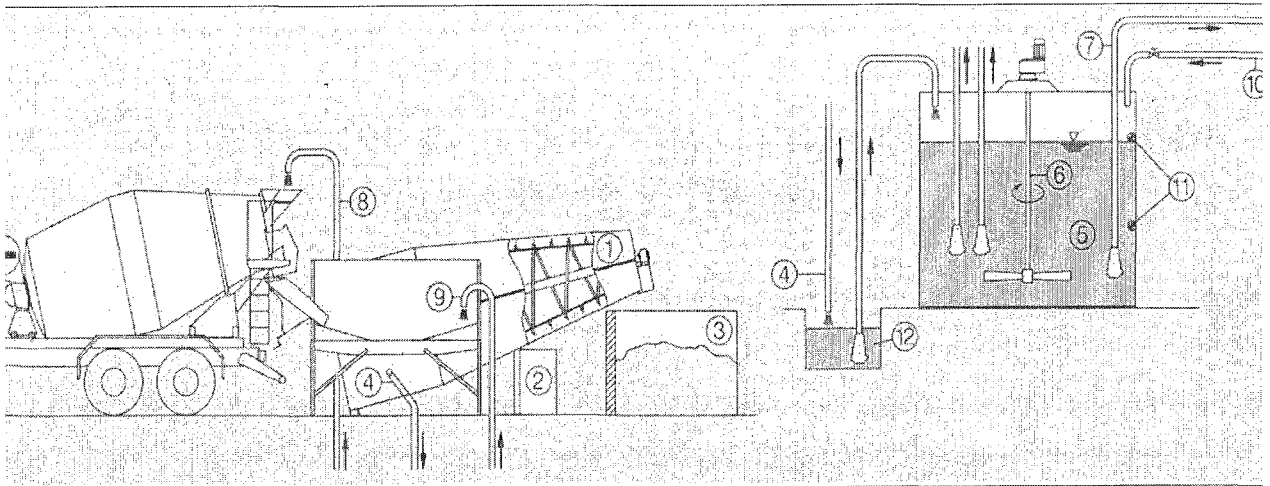


Figure 1.3 Recycleur à béton typique

L'eau recyclée est récupérée dans des bassins où des agitateurs sont nécessaires afin d'éviter la décantation des particules. Si les agitateurs ne fonctionnent pas efficacement et qu'un dépôt se forme dans le fond des bassins, le ciment complétera son hydratation et une couche durcie sera formée dans le fond des cuves. Le nettoyage dans une telle situation est complexe et très dispendieux. La figure 1.5 présente deux schémas typiques utilisant la méthode de récupération à l'aide de la vis sans fin.



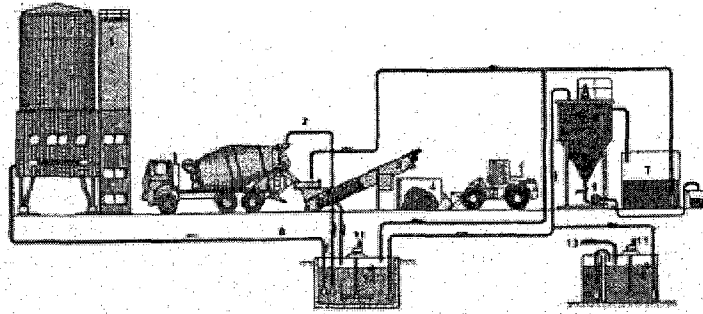


Figure 1.4 Recycleur d'eau avec bassin de récupération des eaux grises

Bien que cette méthode de recyclage comporte le grand avantage de récupérer tous les composants du béton, eau, particules cimentaires, sable et granulats grossier, certains inconvénients limitent encore son utilisation. L'entretien des bassins est dispendieux et les bris de matériel sont fréquents. Les agitateurs de même que les systèmes de pompage servant à récupérer des échantillons d'eau sont souvent obstrués par la présence de particules fines et collantes [Lindon 2005]. Pour contrer ces problèmes, Vickers propose une utilisation constante de l'eau recyclée, voire à chaque jour. Cela peut éviter beaucoup de bris considérant que les pompes répondent mal à des périodes de non-utilisation [Vickers 2002].

1.3.2. Traitements biologiques et chimiques

Une fois l'eau recyclée récupérée dans les bassins prévus à cet effet, il est nécessaire de la traiter avant de la réincorporer dans un nouveau béton. Ce traitement a pour but premier le respect des normes sur l'eau de gâchage du béton qui seront présentées à la section 1.5. Ce traitement consiste principalement en une neutralisation afin de diminuer le pH de l'eau recyclée qui est fortement basique ($\text{pH} > 12$). Du dioxyde de carbone est généralement utilisé pour cette neutralisation. Les particules en suspension seront par la suite tamisées et filtrées jusqu'à ce que l'eau recyclée devienne conforme aux normes [Griffiths 2006]. L'inconvénient majeur de ce traitement est son coût dispendieux pour les producteurs de béton [Su et al 2002].

Enfin, plusieurs variantes et technologies existent afin de perfectionner ce traitement. Par exemple, le Filtra Technology est un procédé complet et autonome qui assure la neutralisation grâce à l'ajout de gaz spécifiques suivi de la filtration complète de l'eau. Ce système comporte deux avantages majeurs ; il est autonettoyant et est conçu dans le but de fonctionner avec une faible consommation d'énergie [Griffiths 2006].

1.3.3. Application du procédé

La technologie de récupérer l'eau, de la traiter et de la réutiliser dans un nouveau béton est utilisée uniquement dans les pays industrialisés. Une des premières usines à avoir popularisé cette innovation est située en France et est munie d'un recycleur depuis 1992. L'usine Garon récupère son eau par le biais de la vis sans fin qui remonte les matériaux solides et laisse retomber l'eau dans les bassins, tel que mentionné ci-haut. Par la suite, l'eau recyclée reçoit le traitement approprié pour la rendre conforme aux normes européennes et est réutilisée pour la production de béton frais ou pour laver les bétonnières qui reviennent des livraisons.

En 1992, les coûts d'installation étaient de 420 000 \$ CAD (270 000 euros). Le système fonctionne toujours bien et les propriétaires de l'usine se disent satisfaits de leur investissement. Ils suggèrent cependant de prévoir un second bassin d'entreposage de l'eau pour répondre aux périodes de pointe exceptionnelles des retours de béton ou pour assurer le fonctionnement lors des bris et ou des opérations de maintenance des premiers bassins. De plus, ils mentionnent l'importance de bien sensibiliser les employés au fonctionnement du recycleur de même que sur ses limites, afin d'éviter les mauvais résultats découlant de l'utilisation des eaux de lavage [Maton et Chatenet 1992].

1.4. Caractérisation de l'eau recyclée traitée

Les différents processus servant à récupérer l'eau recyclée fonctionnent généralement bien, mais ils présentent tous certaines limites et les utilisateurs doivent être vigilants. Le recyclage

d'eau dans le béton demeure une nouvelle technologie et cela explique que les compagnies soient réticentes quant à son application [Sandrolini et Franzoni 2001].

En effet, un excès d'impuretés dans l'eau de gâchage peut affecter les propriétés du béton produit. Les impuretés peuvent avoir des effets principalement sur le temps de prise, la maniabilité, la stabilité volumétrique, la résistance et la durabilité du béton. À titre d'exemple, les chlorures s'attaquent aux barres d'armatures dans le béton. Une quantité trop importante de sulfates provoque de l'expansion et la détérioration prématurée du béton, surtout si le sol en contact avec le béton a aussi une haute teneur en sulfates. Enfin, l'eau de gâchage peut également réagir avec les adjuvants et contrer ou modifier leurs effets sur le béton [Kosmatka et al 2004]. D'ailleurs, plus l'eau recyclée est concentrée, plus les effets sur le béton seront accentués [Inforbloc 2005].

Considérant tous les effets que peut engendrer l'utilisation de l'eau recyclée, il faut connaître ses principales caractéristiques avant de l'incorporer dans un nouveau béton. La caractérisation la plus fréquente de l'eau consiste à connaître sa densité, ce qui permet de trouver directement sa concentration, exprimée en partie par million (ppm).

1.4.1. Composition chimique

Vickers insiste sur l'importance de connaître la composition chimique de l'eau de lavage de même que sa température [Vickers 2002]. Su et al. [2002] portent leur attention particulièrement sur le pH de l'eau de même que sur la turbidité qui peut également servir à déterminer la concentration. Enfin, chimiquement, les deux composants le plus intéressants à connaître sont la teneur en chlorures et en sulfates [Su, et al. 2002].

La composition chimique de l'eau recyclée traitée, telle la nature et la concentration des substances en solution et en suspension, est variable dans le temps et d'une usine à l'autre. Les propriétés varient principalement en fonction des paramètres d'opération des usines de recyclage du béton frais et en fonction des caractéristiques des bétons récupérés. La teneur en adjuvant, le type de matière cimentaire et la nature des granulats influencent grandement les

caractéristiques de l'eau recyclée qui sera récupérée. En bref, le problème est que les propriétés de l'eau recyclée varient considérablement [Vickers 2003].

L'analyse chimique des matières en suspension (séchées) dans l'eau recyclée montre que les teneurs des principaux oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3) s'apparentent à celle d'un ciment Portland. Seule la teneur en CaO est parfois plus faible [Chatveera, et al. 2006]. Sandrolini et Franzoni [2001] ont montré que 80 % à 90 % des particules en suspension ont un diamètre inférieur à 100 μm avec une classe dominante d'environ 20 μm . Les particules sont principalement constituées de CaCO_3 (30 % - 40 %), de particules de C-S-H et d'ettringite [Sandrolini et Franzoni 2001 ; Chatveera, Lertwattanaruk et Makul 2006]. Par ailleurs, les matières en suspension ont un très faible potentiel de réactivité chimique comparativement aux ions en solution [Vickers 2003].

Lorsque l'eau recyclée entre dans la fabrication de nouveaux bétons, une attention particulière doit être portée aux adjuvants. L'eau de gâchage peut présenter une composition chimique qui pourrait entrer en conflit avec les formulations d'adjuvants, et ainsi contrer ou modifier leur efficacité.

Quant au pH de l'eau recyclée, il varie approximativement entre 12,0 et 12,7 [Gagné et Blanchard 2006]. Ce pH élevé est principalement dû à la présence d'alcalis en solution. Selon les matériaux entrant dans la fabrication des bétons recyclés et selon la composition chimique des eaux de lavage, les eaux recyclées traitées contiennent certaines quantités des chlorures et des sulfates en solution. Les concentrations peuvent être très variables dans les temps et d'une usine à l'autre, tel que mentionné précédemment.

1.4.2. Les alcalis dans l'eau recyclée

Le pH basique de l'eau grisé est attribuable à l'importante quantité d'alcalis qui se trouvent en solution [Lindon 2005]. Pour un béton typique ($E/C = 0,5$) contenant 350 kg / m^3 de ciment (0,80 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) et 175 kg / m^3 d'eau recyclée traitée, l'utilisation d'eau recyclée contribue à augmenter d'environ 5 % le contenu en alcalis du béton. Même si l'apport en alcalis est

relativement faible, les effets potentiels sur les propriétés du béton peuvent être significatifs en raison de la grande influence des alcalis sur la cinétique des réactions d'hydratation du ciment Portland.

Dans l'eau recyclée, les alcalis sont majoritairement présents sous la forme de Na_2SO_4 et de K_2SO_4 . Ceux-ci accélèrent l'hydratation du ciment en diminuant la solubilité du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et en modifiant la réactivité des principaux composés du ciment Portland (C_2S , C_3S , C_3A) [Jawed et Skalny 1978]. L'accélération de l'hydratation se manifeste par un dégagement de chaleur plus important au jeune âge et par une diminution du temps de prise. Le K_2SO_4 accélère davantage la prise que le Na_2SO_4 . Certains auteurs indiquent que les alcalis accélèrent l'hydratation du C_3S et du C_2S de façon plus marquée durant les sept premiers jours, alors que l'effet devient quasi négligeable après 28 jours [Jawed et Skalny 1978]. Par ailleurs, d'autres auteurs n'ont pas trouvé de liens significatifs entre la présence d'alcalis et la vitesse d'hydratation du ciment Portland [Older et Wonnemenn 1983]. Smaoui et son équipe, pour leur part, ont montré que les pâtes de ciment contenant des dosages plus élevés en alcalis (1,25 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) ont une microstructure plus poreuse et plus réticulaire que celle des pâtes ayant une plus faible teneur en alcalis (0,6 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) [Smaoui et al.2005].

1.4.3. Caractéristiques physiques de l'eau recyclée

En plus des alcalis, l'eau de lavage contient des particules solides en suspension. Elles ont cependant un potentiel de réactivité chimique très faible comparativement aux alcalis [Gagné et Blanchard 2006]. Ces fines particules sont principalement des grains de sable ou de gravier très fin, des particules de ciment hydratées et non hydratées, des restes de minéraux et de pouzzolanes et de faibles quantités d'adjuvants qui étaient présents dans la bétonnière [Borger, et al. 1994 ; Vickers 2002].

Physiquement, plus l'eau recyclée contient des particules solides en suspension, plus le rapport E/C effectif du béton produit est diminué. Cela s'explique simplement par le fait qu'une portion de l'eau est substituée par des particules de ciment [Gagné et Blanchard 2006].

Enfin, cette diminution du rapport E/C explique en majeure partie pourquoi les effets sur le nouveau béton sont plus marqués lorsque l'eau recyclée est plus concentrée [Inforbloc 2005]. Il est assez simple de contrôler la concentration de l'eau recyclée. Il s'agit de conserver dans un bassin de l'eau suffisamment chargée et de la diluer avec de l'eau potable pour obtenir la concentration désirée. Il faut donc surdimensionner les bassins pour permettre une dilution au besoin, ce qui peut d'ailleurs prévenir les bris d'équipement [Vickers 2003]. À noter que Chini et al., citant Souwerbren, mentionnent l'importance de protéger l'eau contenue dans les bassins de tous contaminants extérieurs, et d'agiter efficacement afin que les particules solides soient distribuées de façon homogène dans l'eau de lavage [Chini, Muszynski et al. 2001].

Finalement, deux approches sont actuellement dominantes pour utiliser l'eau recyclée. La première consiste en conserver une eau très concentrée et à la diluer en y incorporant de l'eau potable jusqu'à l'obtention de la concentration souhaitée. La seconde propose plutôt la conservation de l'eau à environ 50 000 ppm (limites maximales normalisées) afin de pouvoir incorporer uniquement de l'eau recyclée dans les mélanges [Vickers 2003].

1.4.4. Âge de l'eau recyclée

L'âge de l'eau recyclée influence les propriétés du béton qui sera produit. En bas âge, lorsque l'eau vient tout juste d'être récupérée du lavage, il reste davantage de ciment à hydrater. Cela jouera un rôle principalement sur le temps de prise et sur la résistance à la compression [Vickers 2003].

Une étude détaillée sur l'âge de l'eau recyclée a été menée par Borger et son équipe. Des eaux ayant un temps de conservation (âge) variant entre une et 48 heures ont été testées. La résistance à la compression la plus élevée a été associée à un béton fabriqué avec une eau recueillie deux heures auparavant [Borger, Carrasquillo et Fowler 1994]. Cependant, il est difficile de tirer des conclusions fiables de cette étude puisque l'eau qualifiée d'eau recyclée n'était en réalité qu'une reconstitution en laboratoire, où du ciment Portland a été mélangé avec de l'eau potable. Cela n'est pas représentatif des vraies eaux de lavage et explique facilement qu'après deux heures, le ciment était déjà activé et donc très réactif pour bonifier

ses propriétés liantes. Néanmoins, dans l'industrie courante, il n'est pas nécessairement pertinent de compter les heures de l'eau recyclée puisque toute l'eau recueillie est entreposée et mélangée dans le ou les mêmes bassins.

Enfin, il paraît primordial de connaître les caractéristiques chimiques et physiques de l'eau recyclée qui sera utilisée, de même que les effets que cela peut avoir sur les propriétés du béton frais et durci. Cela permettra de produire un béton conforme aux normes et aux spécifications des devis. En général, il est possible de conclure que l'eau recyclée, dépendamment de sa concentration, aura toujours des effets similaires sur le béton produit [Vickers 2003]. Il est donc plausible de se référer aux études déjà existantes afin d'optimiser l'utilisation des eaux grises.

1.5. Normes relatives à l'utilisation des eaux de lavage

1.5.1. Spécifications générales

Les normes et réglementations environnementales sont de plus en plus sévères quant aux rejets des producteurs de béton [Chini, et al. 2001]. Dans tous les pays, les contrôles se font plus fréquents et les conséquences plus importantes. Environnement Canada et certains règlements provinciaux interdisent l'évacuation dans les égouts municipaux des eaux de lavage des producteurs de béton [Kosmatka 2004]. Les mêmes règlements sont également appliqués aux États-Unis où l'agence de protection environnementale (Environmental Protection Agency) tente d'imposer aux producteurs de béton le contrôle total de leur eau de lavage. Leur pH trop élevé cause définitivement la détérioration du réseau et complique la gestion des eaux usées aux usines d'épuration des municipalités [Chini, Muszynski, Bergin et Ellis 2001].

Dans un autre ordre d'idées, il faut non seulement contrôler le rejet des eaux grises, mais également leur utilisation. L'Association canadienne du ciment Portland suggère la limite à des eaux ayant une concentration maximale de 50 000 ppm [Borger, Carrasquillo et Fowler

1994]. Il est primordial de respecter les normes d'utilisation de l'eau recyclée afin d'assurer de bonnes propriétés aux bétons qui en contiennent [Vickers 2003]. La normalisation a pour but de protéger le consommateur et d'assurer une certaine qualité à l'industrie.

Les prochains paragraphes présenteront les principales normes québécoises, canadiennes et américaines. Un tableau cumulatif de ces trois normes facilitera les comparaisons, et une norme européenne sera également présentée afin de valider les articles de référence provenant de différents pays européens.

1.5.2. Norme NQ

La norme NQ 2621-900/2002 article 6.1.5 sert de guide aux producteurs de béton québécois. Elle stipule principalement que « l'eau utilisée dans le gâchage du béton doit être limpide et exempte de quantité nuisible d'alcalis, d'acides, d'huiles, de matières organiques, de matières en suspension ou de toutes autres substances nuisibles. » Une eau qui n'est pas exempte des nuisances énumérées ne peut convenir à la confection de gâchées. D'ailleurs, l'eau de lavage non traitée ne peut pas être utilisée dans la fabrication du béton. Enfin, l'eau recyclée traitée doit respecter les critères énumérés au tableau 1.1.

1.5.3. Norme CSA

Les entreprises canadiennes relèvent de l'article 4.2.2 de la norme CSA A23.1-04, qui débute en mentionnant que toute eau potable est acceptée dans la fabrication de béton. Il y est également indiqué que l'eau non potable peut être utilisée s'il est possible de démontrer que le béton fabriqué antérieurement avec cette eau a obtenu la résistance et la durabilité escomptée. En bref, il est possible d'utiliser de l'eau non-potable ou de l'eau de lavage, traitée ou non, si les résistances à 28 jours sont égales ou supérieures à 90 % de la résistance obtenue avec le mélange témoin. Ce mélange témoin doit être produit avec les mêmes matériaux et dans les mêmes proportions, en contenant une eau préalablement jugée acceptable. L'eau de gâchage doit être évaluée tous les six mois, voire fréquemment si des changements sont soupçonnés

quant à sa composition. Pour évaluer l'eau, il faut utiliser un béton avec une résistance d'au moins 25 MPa et un échantillon d'eau représentatif.

Une attention particulière doit être portée à la qualité de l'eau, car une quantité excessive d'impuretés dans l'eau de gâchage peut causer de l'efflorescence, une décoloration, la corrosion des barres d'armature ou des problèmes de durabilité du béton. Afin de s'assurer de la qualité de l'eau utilisée, des limites facultatives sont suggérées quant aux concentrations maximales permises dans l'eau de gâchage (voir tableau 1.1).

À la fin de l'article 4.2.2, certains ajouts réglementent la quantité de chlorures et d'alcalis dans le béton, soient :

- L'apport de l'eau de gâchage en ions Cl ne doit pas engendrer le dépassement de la limite de chlorures admissible dans le béton selon la norme CSA A23.1-04 article 4.1.1.2.
- L'apport en alcalis de l'eau de gâchage ne doit pas engendrer le dépassement de la limite en alcalis admissible dans le béton selon la norme CSA A23.2-27A.

1.5.4. Norme ASTM

La norme ASTM C94 est semblable à la norme CSA mais régit les États-Unis. Elle stipule que l'eau de gâchage doit être claire et d'apparence propre. Si elle contient une certaine quantité de substances qui modifient sa couleur, son odeur, son goût ou son apparence, cette eau ne doit pas être utilisée sans avoir préalablement été testée. Les résultats de ces tests doivent montrer que l'eau n'affecte en rien la qualité du produit. L'eau recyclée peut être utilisée dans le béton si elle respecte les limites fixées dans le tableau 1.1. Lors des premières utilisations de l'eau recyclée, celle-ci doit être testée hebdomadairement durant quatre semaines, et mensuellement par la suite. Une particularité ajoutée à la norme ASTM porte sur l'entraînement d'air dans le béton. Il est mentionné de porter une attention particulière aux agents entraîneurs d'air utilisé avec de l'eau, et d'effectuer des ajustements quant aux dosages d'adjuvants si nécessaire.

Tableau 1.1 Comparaison entre quatre normes régissant l'utilisation de l'eau recyclée

Concentration maximale dans l'eau de gâchage (mg/L)

| | NQ 2621/900 2002 | CSA A23 1-04 2004 | ASTM C94 2004 | EN 1008 en révision |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Ions Cl- (béton précontraint) | 500 | 500 | 500 | 600 |
| Ions Cl- (autres bétons) | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 200 |
| Sulfates | 3 000 | 3 000 | 3 000 | 2 000 |
| Alcalis | 600 | 500 | 600 | ≤1% des agrégats dans le béton |
| Particules solides | 50 000 | 50 000 | 50 000 | ≤4 cc |

Critères d'acceptabilité

| | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|
| Résistance à la compression | Le f'c à 28 jours d'un béton fabriqué avec de l'eau de lavage doit être égal ou supérieur à 90% de la résistance à la compression à 28 jours d'un béton de référence | Le f'c à 28 jours d'un béton fabriqué avec de l'eau de lavage doit être égal ou supérieur à 90% de la résistance à la compression à 28 jours d'un béton de référence | Le f'c à 7 jours d'un béton fabriqué avec de l'eau de lavage doit être égal ou supérieur à 90% du f'c à 7 jours d'un béton fabriqué avec de l'eau jugée conforme | La moyenne des f'c à 7 et 28 jours d'un béton avec eau de lavage doit être égale ou supérieure à la moyenne des f'c à 7 et 28 jours d'un béton contenant de l'eau potable ou distillée |
| Temps de prise | | | Le temps de prise du béton fabriqué avec de l'eau de lavage doit être au maximum plus tôt de 1h00 ou plus tard de 1h30 que le temps de prise du béton de référence | |

1.6. Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton frais

1.6.1. Affaissement

Plusieurs auteurs parviennent approximativement aux mêmes conclusions concernant l'impact engendré par l'eau recyclée sur l'affaissement du béton. Gagné et Blanchard [2006] mentionnent que l'affaissement est fortement diminué quand l'eau grise est utilisée. Il semble également que la diminution de l'affaissement est proportionnelle au volume et à la concentration de l'eau recyclée [Chatveera, et al. 2006]. De façon plus modérée, des chercheurs italiens attribuent effectivement une perte d'affaissement due à la substitution de l'eau potable, mais cette variation est pour eux minime [Sandrolini et Franzoni 2001]. Ces mêmes conclusions sont partagées par Su et son groupe [Su, Miao et Liu 2002]. Enfin, Malisch a poussé davantage cette investigation et prétend que l'affaissement diminue avec l'incorporation d'eau recyclée, mais uniquement sur les bétons, alors que les mortiers ne semblent pas influencés par cet effet [Malisch 1996].

À titre d'exemple, une étude menée en Slovénie en 2003 a démontré une baisse drastique de l'affaissement. Un béton de rapport E/C de 0,40, ayant 40 MPa de résistance nominale à 28 jours, a obtenu 130 mm d'affaissement lorsqu'il a été fabriqué avec de l'eau potable uniquement. Ce même mélange, incluant de l'eau recyclée à 57 000 ppm, a produit un affaissement de 40 mm seulement. L'auteur attribue cette perte importante à la quantité de fines particules introduites dans le mélange avec l'eau grise [Selih, Milost et Cuznar 2003].

Plutôt que de mentionner l'affaissement du béton, certains auteurs préfèrent discuter de sa maniabilité. Les conclusions demeurent cependant dans le même ordre d'idées, c'est-à-dire que la mise en place est plus difficile sur le chantier, selon Chini et son équipe qui citent les travaux de Harr et al. [Chini, et al. 2001]. La présence de fines particules, mais aussi les restes d'adjuvants semblent être la cause de la moins bonne maniabilité du béton [Borger, et al. 1994].

1.6.2. Teneur en air

Contrairement à l'affaissement, relativement peu de données sont disponibles quant à l'influence de l'eau recyclée sur l'entraînement d'air. Cet ajout est d'ailleurs moins nécessaire dans les pays où le climat est peu variable. Su et ses collaborateurs ont montré que l'eau recyclée n'a pas d'effet sur le volume d'air des bétons ne contenant pas d'agent entraîneur d'air. La teneur en air varie de façon minime, soit en augmentant ou en diminuant légèrement, mais sans qu'il soit possible d'établir une corrélation [Su, et al. 2002].

L'équipe de Smaoui, quant à elle, a montré qu'une augmentation de la teneur en alcalis du ciment (de 0,6 % à 1,25 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) a engendré une légère augmentation du volume d'air (+ 0,5 %) des bétons avec et sans air entraîné [Smaoui, et al. 2005]. Selon Pigeon et coll., l'utilisation d'un ciment riche en alcalis améliore la stabilité du réseau de bulles d'air des bétons à air entraîné [Pigeon, et al. 1992]. Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'eau recyclée, qui contient des alcalis, pourrait avoir des effets favorables sur la production et la stabilité du réseau de bulles d'air des bétons à air entraîné.

En revanche, Gagné et Blanchard ont noté une perte importante du volume d'air et ce de façon plus marquée lorsque l'eau recyclée est plus concentrée [Gagné et Blanchard 2006]. Il faut donc mettre une quantité plus importante d'agents entraîneurs d'air pour contrer l'effet de l'eau chargée de particules [Malisch 1996].

Enfin, la même étude menée en Slovénie, mentionnée ci-dessus pour ses essais sur l'affaissement, a démontré des résultats qui retiennent l'attention quant aux pertes d'air entraîné. Avec une eau à 57 000 ppm, la teneur en air du béton chute de 7 % à 4,8 % alors qu'une même quantité d'adjuvants est utilisée [Selih, et al. 2003].

1.6.3. Temps de prise

Tout comme la teneur en air, le temps de prise peut être affecté par l'eau recyclée. Son utilisation diminue toujours le temps de prise d'au moins 45 minutes. La diminution est

d'autant plus marquée quand le béton contient des agents entraîneurs d'air ou a un faible rapport E/C. Par ailleurs, il semble difficile d'établir une corrélation entre la quantité de solide dans l'eau grise et la diminution du temps de prise [Gagné et Blanchard 2006]. Il est de surcroît logique que l'apport en particules de ciment hydratées et non hydratées agisse à titre d'accélérateur de prise [Malisch 1996].

La présence d'alcalis diminue également le temps de prise du béton [Older et Wonnemann 1983 ; He et Li 2005]. Bien qu'une grande quantité d'alcalis puisse provoquer une fausse prise [Jawed et Skalny 1978], l'eau recyclée n'est pas suffisamment basique pour engendrer ce dommage. D'ailleurs, l'ajout de gypse pourrait réguler sans trop de difficulté le temps de prise. Le problème est que le gypse est incorporé directement dans les mélanges de ciment alors qu'il est pour le moment impossible de prévoir si ce ciment sera utilisé avec de l'eau recyclée ou de l'eau potable [Jawed et Skalny 1978]. Possiblement, lorsque l'usage de l'eau recyclée sera plus répandu, l'option d'ajuster le temps de prise directement en incorporant plus de gypse dans le ciment sera une alternative intéressante.

En contradiction à ce qui vient d'être mentionné, Chini n'observe aucun lien entre l'utilisation de l'eau recyclée et le temps de prise. Celui-ci est parfois légèrement plus long, d'autres fois plus court, et ce, peu importe la concentration de l'eau [Chini, et al. 2001]. En Taïwan, les résultats des essais faits sur mortiers sont relativement semblables. Le temps de prise peut varier de plus ou moins 15 minutes, mais demeure cependant toujours dans les limites prescrites par la norme ASTM (voir tableau 1.1).

Pour ajuster le temps de prise, surtout si l'eau recyclée est jeune et contient beaucoup de particules de ciment non hydratées, il suffit d'incorporer un retardateur de prise [Vickers 2003]. En plus de la composition et de l'utilisation de l'eau grise, la température joue également un rôle sur le temps de prise du béton.

1.6.4. Température

Il est important de connaître et de contrôler la température de l'eau recyclée, puisque cela aura des effets sur les autres propriétés du béton [Vickers 2002] [Gagné et Blanchard 2006].

La température de l'eau recyclée est généralement assez élevée pour trois raisons principales : premièrement, l'hydratation des grains de ciment qui est en cours est exothermique. Deuxièmement, l'agitation constante de l'eau produit de la chaleur. Troisièmement, les bassins sont presque toujours recouverts pour éviter l'évaporation de l'eau ou sa contamination. Si la température de l'eau recyclée devient trop chaude, il faut l'ajuster avec de l'eau potable avant de l'utiliser comme eau de gâchage [Vickers 2003].

Lorsque de l'eau chaude est incorporée dans le béton, qu'il s'agisse d'eau potable ou recyclée, les réactions sont accélérées et le temps de prise est plus rapide [Vickers 2003]. Les mêmes effets se produisent lorsque la température environnante est élevée, surtout lors des canicules de l'été [Kosmatka 2004]. En bref, il faut savoir ajuster la température de l'eau de gâchage en fonction de la température du milieu de coulée, du temps de transport si nécessaire, etc. et prendre en compte qu'une eau chaude accélère la prise du béton. [Vickers 2003].

Enfin, une dernière étude apporte une variante intéressante sur la température des bétons. Il est vrai que les particules de ciment anhydres contenues dans l'eau recyclée tendent à s'hydrater et à dégager de la chaleur. Parallèlement, la substitution de l'eau potable engendre une diminution du rapport E/C, ce qui diminue la température d'hydratation. Ainsi, les effets contraires s'annulent et l'influence de l'eau recyclée devient négligeable [Chatveera, et al. 2006].

1.6.5. Masse volumique

Plusieurs auteurs s'accordent pour dire que le béton contenant de l'eau recyclée a une masse volumique plus élevée que son béton de référence, entre autres à cause de l'ajout de fines

particules et de la diminution de l'air entraîné [Su, Miao et Liu 2002] ; [Selih, Milost et Cuznar 2003].

La densité d'une eau recyclée de 50 000 ppm est de 1,03 kg/l [Vickers 2003]. Considérant que celle de l'eau potable est de 1,00 kg/l, il est normal que les bétons contenant de l'eau recyclée soient plus denses. En revanche, il faut garder en mémoire que la substitution de l'eau potable par de l'eau grise diminue systématiquement le rapport E/C. L'effet est ainsi contré et l'eau recyclée n'affecte donc pas réellement la masse volumique du béton [Chatveera, et al. 2006].

1.7. Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton durci

1.7.1. Résistance à la compression

Il a été souligné au paragraphe 1.6.2 que l'eau recyclée engendre souvent une diminution de la teneur en air des bétons. Il est possible d'associer une perte de 1 % d'air à une hausse de 4 % à 5 % de la résistance en compression [Gagné et Blanchard 2006]. Logiquement, la présence d'eau recyclée devrait augmenter un peu la résistance à la compression. Selon certains auteurs, la résistance à la compression augmente d'environ 15 % quand de l'eau recyclée est utilisée [Selih, et al. 2003]. D'autres mentionnent des gains de résistance allant jusqu'à 20 % à 28 jours, et attribuables à l'apport en ciment de l'eau recyclée. Une étude, menée en Floride, mentionne que les gains de résistance sont plus rapides [Chini, et al. 2001].

Inversement, des chercheurs thaïlandais ont observé des baisses de résistance systématiques avec l'usage de l'eau recyclée. Le béton produit est plus poreux que l'échantillon de référence, et la résistance est de l'ordre de 85 % à 94 % du béton témoin [Chatveera, et al. 2006]. Dans ce même ordre d'idées, deux groupes d'auteurs s'accordent pour dire qu'une forte concentration en alcalis dans un béton diminue la résistance à la compression [Jawed et Skalny 1978 ; Older et Wonnemann 1983].

Jusqu'à présent, certains auteurs mentionnent une augmentation de la résistance à la compression alors que d'autres parlent de diminution. Su et son équipe propose plutôt un mélange de ces deux hypothèses. Jusqu'à sept jours, la résistance est supérieure pour des bétons contenant de l'eau recyclée. Par contre, à 28 jours, l'effet est inversé et les résistances sont approximativement entre 92 % et 93 % par rapport aux bétons contenant que de l'eau potable [Su, Miao et Liu 2002]. Jawed et Skalny en viennent également aux mêmes conclusions ; à sept jours la résistance des bétons avec eau recyclée est plus élevée, mais à 91 jours, elle est légèrement inférieure au béton de référence [Jawed et Skalny 1978]. Considérant que plusieurs études ont montré une prise plus rapide du béton contenant de l'eau grise, l'hypothèse des hautes résistances à jeune âge semble particulièrement plausible.

Tout compte fait, il n'est pas facile d'établir une corrélation directe entre l'usage de l'eau recyclée et la résistance à la compression. Des essais, menés aux États-Unis, ont présenté des résultats contradictoires, où certains échantillons montrent une augmentation de la résistance alors que d'autres échantillons du même mélange indiquent le contraire [Malisch 1996].

En Italie, les résultats d'essais varient aussi considérablement. À sept jours, deux bétons contenant de l'eau recyclée ont obtenu des résultats inverses, soit un échantillon légèrement plus résistant que le béton témoin et le second échantillon un peu moins résistant. Ces deux mêmes échantillons, testés à 28 jours, ont obtenu une résistance de 96,5 % par rapport au béton contenant uniquement de l'eau potable. Enfin, les auteurs concluent que les résistances respectent cela les normes d'usage et qu'il ne semble pas exister une relation directe entre la quantité de solide dans l'eau et la résistance à la compression. Il est possible que la dimension des particules en suspension ait un impact sur cette propriété [Sandrolini et Franzoni 2001].

Pour terminer l'évaluation de la résistance à la compression, l'étude de Gagné et Blanchard propose une explication intéressante. L'eau recyclée tend à diminuer légèrement la résistance en compression des bétons, mais son utilisation engendre directement la diminution du rapport E/C tel que mentionné à plusieurs reprises dans ce mémoire. Ainsi, la baisse du rapport E/C vient contre l'effet néfaste engendré par l'usage de l'eau recyclée comme eau de gâchage [Gagné et Blanchard 2006].

1.7.2. Résistance aux cycles de gel - dégel et à l'écaillage

À l'opposé des études sur la résistance à la compression, il existe peu de littératures concernant les résistances aux cycles de gel - dégel ou à l'écaillage. En effet, les conditions hivernales n'affectent pas tous les pays ce qui explique la rareté des études.

Au Québec, Gagné et Blanchard n'ont eu d'autres choix que d'étudier la question plus en profondeur. Le paramètre, découlant de l'utilisation de l'eau recyclée, qui influence le plus la résistance au gel et à l'écaillage est la perte du volume d'air dans le béton. Si aucun moyen n'est entrepris pour contrer les pertes d'air, les essais de gel - dégel et d'écaillage donneront des résultats catastrophiques. Par ailleurs, si une dose supplémentaire d'agents entraîneurs d'air permet l'obtention d'un volume d'air adéquat (entre 5 % et 7 % généralement), les essais d'écaillage et de gel - dégel montrent des résultats conformes aux normes. Des essais ont été effectués avec des bétons de 35 MPa et les valeurs obtenues sont satisfaisantes [Gagné et Blanchard 2006].

Les autres études sur le sujet permettent de tirer des conclusions semblables. Par rapport aux alcalis, il semble que leur présence en quantité minime ne nuise pas aux bons résultats des essais de gel - dégel et d'écaillage, à condition que le béton contienne suffisamment d'air entraîné [Smaoui, et al. 2005].

1.8. Durabilité des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée traitée

Le recyclage de l'eau dans le domaine du béton est un processus relativement jeune, ce qui explique le peu de littérature sur la durabilité des bétons fabriqués à partir des eaux de lavage. L'efflorescence, la corrosion des barres d'armature, l'instabilité volumique et la durabilité à long terme sont des facteurs qui peuvent éventuellement être affectés par cette nouvelle source d'eau [Borger, et al. 1994].

1.8.1. Perméabilité

Tout d'abord, les fines particules ajoutées par l'eau recyclée peuvent être vues comme des fillers, ce qui explique pourquoi les bétons contenant de l'eau recyclée sont moins poreux [Sandrolini et Franzoni 2001]. Borger et son équipe croient également à une baisse de la perméabilité, et Malisch a démontré cet effet lors d'essais sur mortier [Borger, et al. 1994] ; [Malisch 1996]. Dans cette optique, la perméabilité des bétons est diminuée et la durabilité à long terme risque d'être meilleure. À noter que plusieurs propriétés découlent de la perméabilité des bétons.

1.8.2. Résistance aux sulfates

Les mêmes auteurs ayant démontré une baisse de la perméabilité poursuivent en mentionnant une augmentation de la résistance aux sulfates, autant sur les bétons que sur les mortiers [Borger, Carrasquillo et Fowler 1994] ; [Malisch 1996]. À l'inverse, une étude menée en Thaïlande démontre que les bétons avec de l'eau recyclée sont plus poreux et perdent plus de poids lors des essais de résistances aux sulfates [Chatveera, et al. 2006]. Les essais de cette étude ont été effectués avec une eau concentrée à 63 400 ppm et des rapports E/C élevés.

1.8.3. Microfissuration

La microfissuration est également reliée étroitement à la perméabilité des bétons. Des essais sur des bétons de 35 MPa avec eau recyclée ont démontré une excellente résistance aux cycles de gel et de dégel [Gagné et Blanchard 2006].

Par contre, lorsqu'un béton contient beaucoup d'alcalis, il développe des microfissures plus tôt et en quantité plus importante [He et Li 2005]. Cela est, en partie, attribuable à la prise plus rapide du béton, de même qu'à la diminution du ressuage observée dans les bétons à forte teneur en alcalis [Jawed et Skalny 1978].

1.8.4. Retrait de séchage

L'utilisation d'eau recyclée traitée pour le gâchage des bétons peut produire une forte augmentation du retrait de séchage. Les travaux de Chatveera et coll. ont montré que le retrait de séchage de bétons ayant des rapports E/C de 0,50, 0,60 et 0,70 augmentait proportionnellement avec la teneur en matières en suspension dans l'eau recyclée [Chatveera, et al. 2006]. Le retrait de séchage des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée à 64 000 ppm est de 23 % (E/C = 0,7) à 33 % (E/C = 0,5) plus élevé que celui des bétons témoins. Les auteurs n'ont formulé aucune explication sur cette augmentation, mais elle semble attribuable à l'hydratation plus rapide du ciment.

La présence d'alcalis présente à son tour des résultats difficiles à expliquer sur le retrait de séchage. Un apport en alcalis directement dans le clinker augmente le retrait. En contrepartie, lorsque les alcalis proviennent d'une source extérieure, voire de l'eau recyclée, ceux-ci tendent à réduire le retrait de séchage. Dans un ordre d'idées un peu différent, la présence d'alcalis semble augmenter l'expansion du béton sous l'eau [Jawed et Skalny 1978].

Enfin, certaines études sont complètement nuancées quant au retrait des bétons contenant de l'eau recyclée. Une étude en Slovénie, avec une eau à 57 000 ppm, démontre une légère augmentation du retrait avant 30 jours puis une faible diminution après ce temps. L'auteur conclut que ces variations ne sont pas considérables [Selih, et al. 2003]. Chini et coll. parviennent pratiquement à la même conclusion ; il semble impossible d'établir une corrélation entre la présence d'eau recyclée et le retrait [Chini, et al. 2001].

1.8.5. Perméabilité aux ions chlorures

La seule étude à ce jour concernant la perméabilité aux ions chlore des bétons contenant de l'eau recyclée traitée a été effectuée en Floride. Les résultats obtenus sont qu'à 28 jours, la perméabilité aux ions Cl⁻ varie entre élevée et modérée, alors qu'à 56 jours, elle est plutôt modérée, voire faible [Chini, et al. 2001]. Il est normal d'observer une diminution de la

perméabilité aux ions Cl^- avec le temps puisque l'hydratation du béton se complète lentement et le béton, comme suite à sa cure, devient légèrement moins perméable.

1.8.6. Corrosion

Enfin, les mêmes chercheurs qui ont mené l'étude en Floride ont tenté un essai de corrosion expérimental, selon leur propre montage. À première vue, le béton contenant de l'eau recyclée ne semble pas résister aussi bien à la corrosion que le béton fabriqué avec uniquement de l'eau potable [Chini, et al. 2001].

1.9. Viabilité dans un contexte de développement durable

Au cours du siècle dernier, le béton est devenu le matériau le plus utilisé à l'échelle planétaire [Aïtein 2003]. L'industrie du béton ne cesse de s'accroître, et à titre d'exemple, environ 25 000 employés y travaillent de près ou de loin au Royaume-Uni. Cette production est responsable du tiers des extractions minérales de tout le pays. Au total, 1 200 usines de béton prêt à l'emploi sont réparties, pour une production annuelle de 23,5 millions de mètres cubes. Bien que les producteurs tentent de cacher la quantité de rejet produite, il s'agit de 20 à 80 tonnes de déchets chaque mois, soit possiblement près d'un million de tonnes de rejets annuellement uniquement pour le marché du béton prêt à l'emploi [Sealey, et al. 2001].

Il est difficile de bien démêler ces rejets et d'en disposer dans les sites appropriés. Au Royaume-Uni, il en coûte environ 300 livres (≈ 600 \$ CAD) pour se débarrasser de 20 tonnes de déchets. Malgré ces chiffres impressionnants, l'industrie du béton produit beaucoup plus de matériel consommable et utile que de déchets [Sealey, et al. 2001].

D'un autre côté, l'utilisation de l'eau recyclée pour la production des bétons a connu une progression importante au cours des 15 dernières années [Borger, et al. 1994] ; [Nelms, et al. 2005]. Cette technique a d'abord vu le jour dans les pays les plus développés et les plus industrialisés [Lindon 2005 ; Uchikawa 2000]. Cette progression s'explique par l'augmentation des coûts de l'eau potable et par des règles environnementales plus sévères

concernant les caractéristiques physico-chimiques des effluents déversés directement dans l'environnement ou dans les réseaux d'égouts municipaux [Borger, et al. 1994].

Afin de s'inscrire dans un cadre de développement durable, les producteurs de béton doivent tendre à recycler l'eau, le sable et les granulats [Odd Gjørv et Sakai 2000]. D'ailleurs, l'eau douce est de plus en plus rare à l'échelle planétaire [Bauma 1995]. Bien qu'il y ait déjà beaucoup d'amélioration afin de diminuer la quantité d'eau utilisée dans le béton, par exemple la réduction du rapport E/C, il faut éventuellement se diriger vers un recyclage complet des matériaux [Odd Gjørv et Sakai 2000].

Selon plusieurs auteurs, le recyclage d'eau deviendra assurément rentable commercialement et sur le plan environnemental. [Bauma 1995] ; [Lindon 2005]. Il deviendra plus dispendieux de se débarrasser des déchets et des résidus industriels [Sealey, et al. 2001], et il est probable qu'une taxe sur l'eau potable soit imposée sous peu [Selih, et al. 2003]. Cela est sans compter les permis nécessaires pour traiter et rejeter de l'eau dans les cours d'eau ou dans les réseaux municipaux. En bref, l'idéal pour les producteurs sera de conserver leur eau de lavage sur leur site et de pouvoir les réutiliser afin d'économiser sur les traitements et les permis dispendieux [Malisch 1996 ; Chini, et al. 2001].

Cependant, il n'est pas suffisant d'être conscientisé à la récupération des déchets et de l'eau. Encore faut-il choisir des solutions qui sont réellement durables et dont l'analyse du cycle de vie a été complétée avec succès. Il faut entre autres considérer les dommages environnementaux découlant du transport, de même que les besoins énergétiques nécessaires aux procédés de récupération choisis.

Par exemple, l'agitation dans les bassins d'entreposage de l'eau recyclée doit être le moins énergivore que possible, et toutes les options sont à considérer afin de parvenir à cette fin [Sealey, et al. 1996]. La méthode de récupération de l'eau par bassin de décantation quant à elle nécessite une vidange des débris fréquemment, ce qui engendre du transport et de l'entreposage de résidus boueux. Bien que ces résidus soient parfois vendus pour leur effet filler, il est plutôt difficile de réussir à en disposer adéquatement [Malisch 1996]. D'ailleurs, il

y a 25 ans, 50 000 sites d'enfouissement étaient disponibles aux États-Unis, contre seulement 5 000 actuellement. Le manque d'espace pour les déchets est de plus en plus flagrant [Chini, et al. 2001]. Cela s'ajoute aux avantages à recycler l'eau et les particules solides en solution pour les nouveaux mélanges de béton.

Malheureusement, certaines personnes ne sont pas encore convaincues que la récupération des eaux de lavage n'a que des bienfaits. Lindon mentionne que l'impact de recycler l'eau usée est faible comparativement aux efforts que cela nécessite [Lindon 2005]. Il présente les 120 litres d'eau utilisés dans chaque mètre cube de béton comme 0,058 % de la consommation en eau potable quotidienne d'un Britannique moyen. Ainsi, le recyclage de l'eau ne semble pas une option valable pour tous les auteurs.

En ce qui concerne la substitution de l'eau potable dans le béton, une étude effectuée à Taïwan sur l'utilisation des eaux souterraines non traitées dans le béton présente des résultats similaires à l'usage des eaux de lavage. Bien que cette solution ne soit pas développée dans le présent mémoire, il est intéressant d'observer que des développements crédibles et complémentaires sont élaborés partout dans le monde [Su, et al. 2002].

Pour conclure cette revue de la littérature, les résultats obtenus lors des études concernant le recyclage d'eau sont essentiellement positifs. En effet, la grande majorité des auteurs soutiennent que l'utilisation de l'eau recyclée traitée n'est pas un obstacle à la fabrication de bétons de bonnes qualités [Malisch 1996 ; Borger, et al. 1994 ; Chini, et al. 2001 ; Selih, et al. 2003 ; Gagné et Blanchard 2006].

2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET PROGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

2.1. Exposé de la problématique

La problématique du projet peut être expliquée fort simplement : la production de béton nécessite une source d'eau, et crée en contrepartie des eaux usées dont le rejet dans les systèmes municipaux n'est plus toléré. Afin de satisfaire les besoins des producteurs de béton, soient une source d'eau de gâchage et une possibilité de disposer des eaux usées, le recyclage de l'eau de lavage dans les usines de béton prêt à l'emploi semble une solution logique.

Or, l'eau utilisée dans les gâchées de béton doit présenter des caractéristiques conformes aux normes tel que mentionnées à la section 1.5. Il faut, en premier lieu, s'assurer de bien connaître les caractéristiques de l'eau recyclée. Il est important de noter son apparence physique, mais aussi de bien connaître sa composition chimique. Il faut connaître sa provenance, et comprendre les mécanismes qui permettent de la recueillir, de l'entreposer et de l'incorporer dans de nouvelles gâchées.

Une fois les caractéristiques de l'eau recyclée bien connues, il est important de s'attarder sur les effets découlant de son ajout dans un nouveau mélange de béton. L'influence doit être observée sur les propriétés du béton frais et durci. Pour le béton frais, il s'agit alors de noter les effets sur l'affaissement, l'entraînement d'air, la variation du temps de prise, la température et la masse volumique. Quant aux caractéristiques du béton durci, la résistance à la compression, la stabilité du réseau de bulles d'air de même que la résistance aux cycles de gel - dégel et à l'écaillage seront les principaux paramètres évalués.

Lorsque l'influence de l'eau recyclée sur le béton est bien définie, il s'agit par la suite d'optimiser le dosage des adjuvants afin de contrer les effets de l'eau recyclée dans le béton. En dernier lieu, lorsque les bétons produits avec de l'eau recyclée traitée possèdent des

caractéristiques acceptables, il est nécessaire de s'assurer de leur bonne durabilité afin que le procédé s'inscrive dans un contexte de développement durable et de respect environnemental.

2.2. Objectifs de la recherche

Le projet de recherche proposé a pour objectif principal d'exploiter les nouvelles connaissances acquises concernant l'utilisation de l'eau recyclée dans le béton. Il s'agit d'optimiser la production industrielle des bétons de ciments fabriqués avec de l'eau recyclée. Globalement, cette recherche permet aussi d'améliorer la performance environnementale de l'industrie du béton. Cette étude repose notamment sur la complémentarité des objectifs industriels et des nouvelles connaissances fondamentales qui seront acquises. En résumé, les objectifs détaillés sont :

- ❖ Identifier et comprendre l'influence des principaux paramètres de composition de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais et durcis...
- ❖ Dégager les principaux mécanismes d'interactions physico-chimiques entre l'eau recyclée et la cinétique d'hydratation des matériaux cimentaires.
- ❖ Comprendre l'influence de l'eau recyclée sur la production et la stabilité du réseau de bulles d'air entraîné (rôle des alcalis, des particules fines en suspension).
- ❖ Caractériser, en laboratoire et en chantier, la durabilité au gel (fissuration interne et écaillage) des bétons contenant des proportions variables d'eau recyclée.
- ❖ Optimiser l'adjuvantation dans les formulations de béton afin de contrer les effets engendrés par l'incorporation d'eau recyclée.
- ❖ Comprendre les limites d'utilisation des stations de recyclage afin de maximiser le recyclage sans affecter la qualité des bétons fabriqués.

Les nouvelles connaissances acquises au cours de ces recherches pourront éventuellement appuyer des propositions de modification aux normes CSA et BNQ encadrant l'utilisation des eaux recyclées pour la production des bétons. Ces modifications peuvent conduire à une utilisation plus optimale et plus rationnelle de l'eau recyclée pour la fabrication du béton prêt à l'emploi.

2.3. Partenaires de recherche

En 2004, la compagnie Demix Béton a mis en opération une station de recyclage du béton frais à son usine de l'arrondissement LaSalle de la Ville de Montréal. Cette initiative est une des composantes majeures de sa politique de développement durable et de conformité environnementale en vue d'une certification ISO 14 000. Il s'agit actuellement de la première et la seule usine de recyclage du béton frais au Québec. L'usine comporte un bassin d'homogénéisation d'une capacité de 100 m³ alimenté par un recycleur à béton de type RA-20 de la compagnie *Schwing*. Au cours de l'année 2007, 14 000 m³ d'eau recyclée traitée ont été utilisés. Actuellement, la station de recyclage n'est pas exploitée à son plein potentiel en raison des limites mal connues de l'utilisation de l'eau recyclée. La compagnie Demix Béton souhaite implanter graduellement cette nouvelle technologie, d'où l'intérêt porté à ces travaux de recherche.

Ciment Saint-Laurent, situé à Longueuil s'est également engagé à titre de partenaire industriel et a communiqué son expertise en matière cimentaire tout au long du déroulement des recherches. Il en va de même pour la compagnie Euclid Canada, situé à Saint-Hubert, qui a servi de guide lors du choix et des modifications des adjuvants employés. Enfin, Transport Québec a apporté un soutien supplémentaire au projet de par sa grande expérience pratique.

D'autre part, ce projet fait suite à la phase I des travaux de recherches sur l'eau recyclée dirigée par le professeur Richard Gagné à l'Université de Sherbrooke. La première partie, qui a fait l'objet du mémoire de maîtrise de madame Stéphanie Blanchard, a consisté davantage au retrait des particules solides de l'eau recyclée et à l'analyse séparée des effets des fines particules et des ions en solution. Des bétons contenant uniquement un ajout de fines

particules (avec une eau de gâchage potable) ont été effectués, de même que des bétons contenant uniquement de l'eau recyclée dont les particules en suspension ont préalablement été retirées. Ainsi, les effets séparés et combinés des principaux composants de l'eau grise ont été évalués en laboratoire, mais n'ont pas été compensés. Les résultats globaux ont été validés en usine, mais sans qu'il soit possible d'évaluer les effets combinés et séparés. Enfin, la caractérisation physico-chimique de l'eau recyclée a également été abordée dans la première partie des travaux.

2.4. Dénomination et abréviations

En premier lieu, voici les quatre mélanges effectués accompagnés d'une notation rapide qui reviendra tout au long de ce rapport. Les formulations détaillées sont présentées à la section 3.5.

- ❖ 25 MPa sans air entraîné (25 MPa SAE)
- ❖ 25 MPa avec air entraîné (25 MPa AE)
- ❖ 30 MPa sans air entraîné (30 MPa SAE)
- ❖ 35 MPa avec air entraîné (35 MPa AE)

Une dénomination spécifique a également été appliquée tout au cours des travaux afin de faciliter l'identification des mélanges (figure 2.1). La première lettre mentionnée représente le lieu d'exécution de la gâchée, soit L pour les gâchés de laboratoire et U pour les gâchées en usine. Les deux chiffres suivants présentent la classe de résistance à la compression à 28 jours exprimée en MPa. Deux ou trois lettres suivront afin d'identifier la présence ou l'absence d'agent entraîneur d'air, soit SAE pour les mélanges sans air entraîné et AE pour les mélanges avec air entraîné. Les deux derniers chiffres représentent la concentration, en partie par million, de l'eau incorporée au mélange. La terminaison adj. suivie d'un chiffre signifie que des adjuvants ont été ajoutés à la formulation initiale pour tenter de rétablir les effets provoqués par l'eau recyclée traitée.

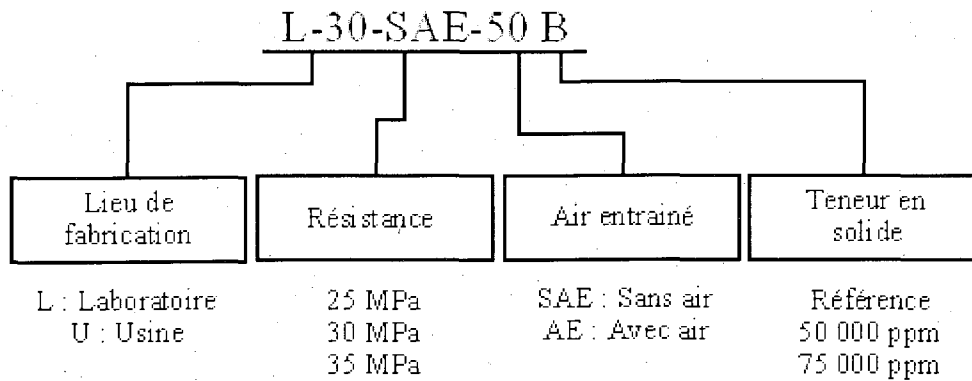


Figure 2.1 Dénomination spécifique des mélanges

2.5. Méthodologie appliquée

Pour répondre aux objectifs de recherche, une première série (**série 1**) d'essais a été effectuée au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Au cours de l'automne 2006, 21 mélanges de béton ont été réalisés, avec deux formulations déterminées en collaboration avec Demix Béton. Ces formulations, (tableaux 3.5 et 3.8) ont été choisies puisqu'elles sont représentatives des bétons produits par l'usine et sont réalisables avec de l'eau recyclée. Cette première série d'essais a principalement permis d'identifier les effets généraux découlant de l'incorporation de l'eau recyclée traitée. Les résultats sont compilés dans la section 5.1, essais préliminaires. Ces essais ont également permis de se familiariser avec les procédures de fabrication de béton en laboratoire, afin d'acquérir un minimum d'expérience pour exécuter la seconde série de mélanges. Tous les mélanges de béton réalisés au cours de la première série d'essais ont été effectués à nouveau au cours de la seconde série.

La deuxième série (**série 2**) d'essais a eu lieu au cours de l'été 2007. Un total de 35 mélanges ont été confectionnés. Toute cette série a été réalisée par la même équipe de travail et avec les mêmes instruments de mesures et d'essai. Les sources d'erreur découlant de la variation de l'équipement ou de la main-d'œuvre technique sont donc en grande partie éliminées. La majeure partie des analyses quant aux effets de l'utilisation de l'eau recyclée traitée découle de cette seconde série d'essais.

Enfin, dans le but de valider les résultats et de les rendre plus accessibles au niveau commercial, trois des quatre mélanges effectués en laboratoire ont été réalisés à l'usine de Demix Béton (**série 3**). Cela permet de faire les modifications finales aux formulations et à l'adjuvantation afin de pouvoir appliquer les conclusions tirées en laboratoire aux bétons fabriqués en usine.

Les organigrammes présentés aux figures 2.2, 2.3 et 2.4 résument l'évolution des travaux en laboratoire ainsi qu'en usine.

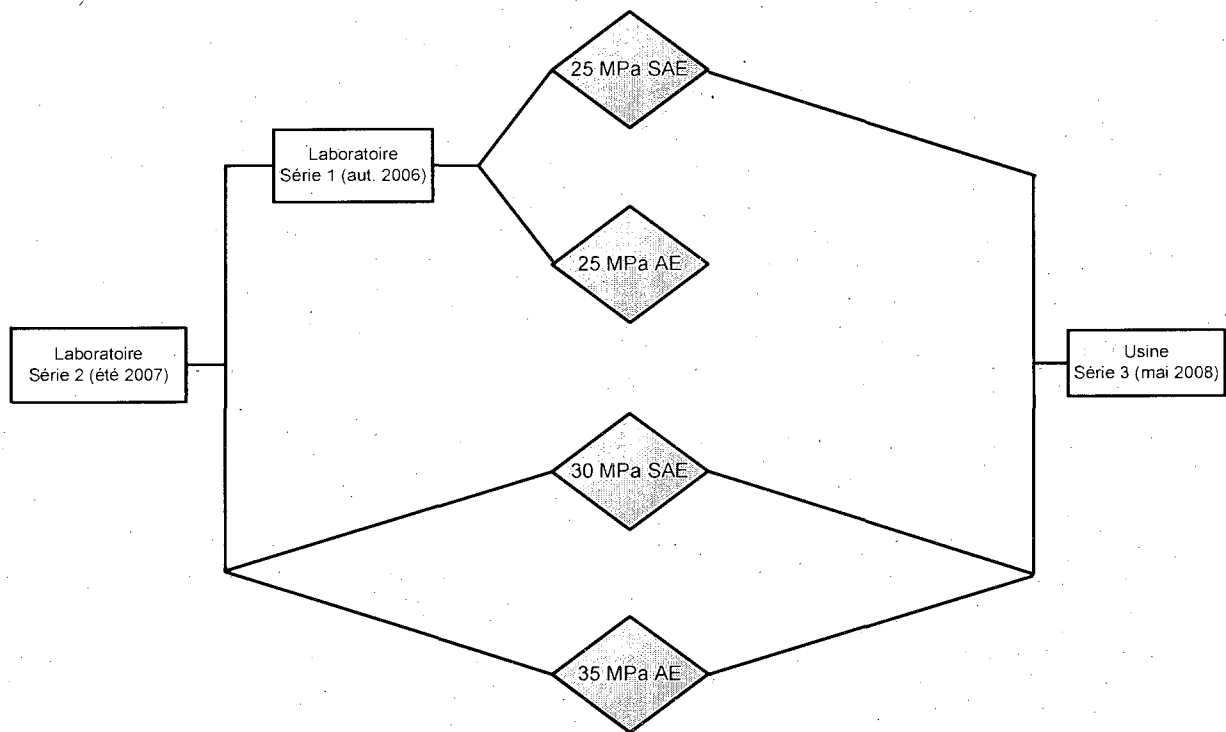


Figure 2.2 Répartition des essais en laboratoire et en usine

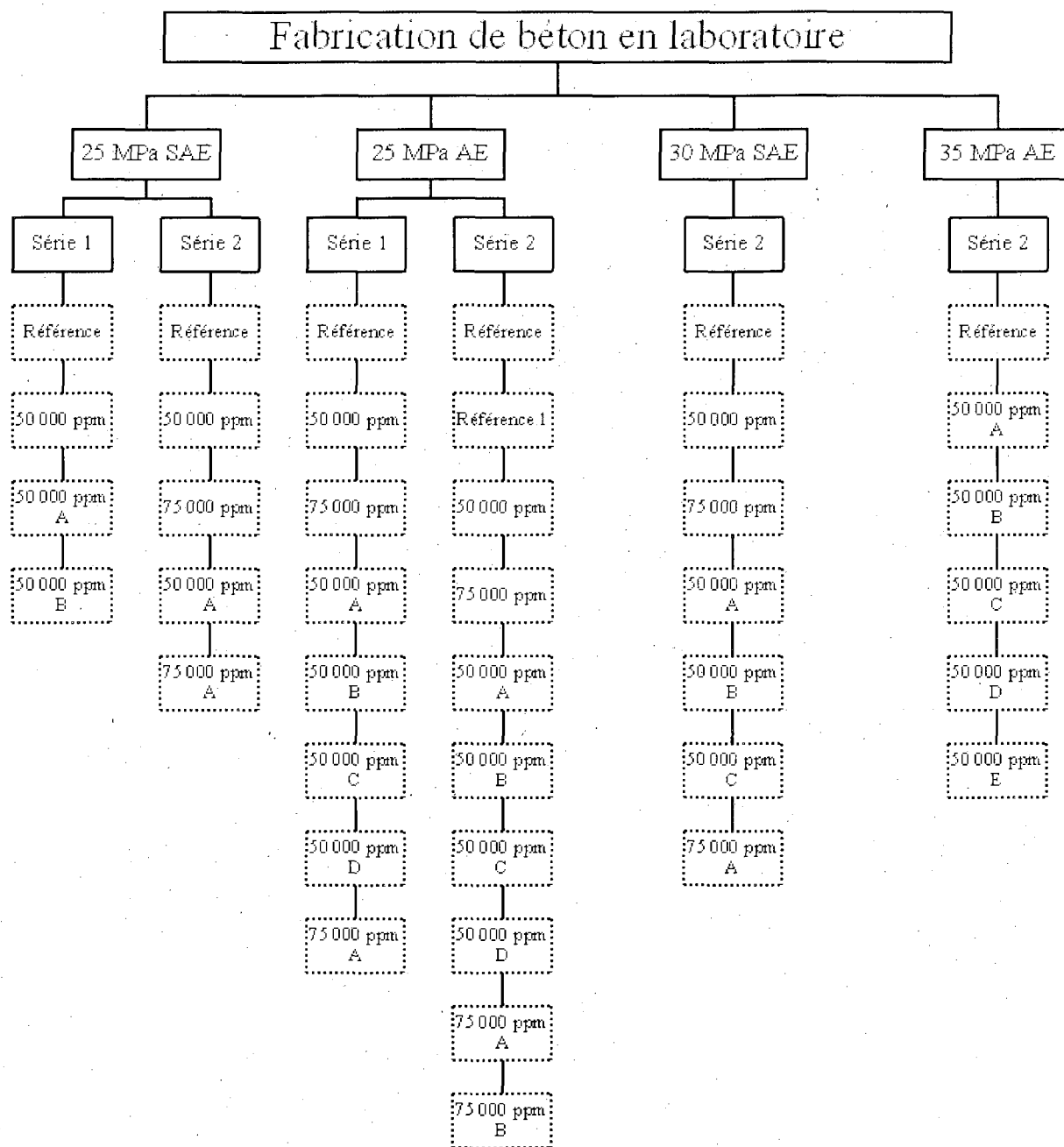


Figure 2.3 Identification de chaque mélange effectué en laboratoire

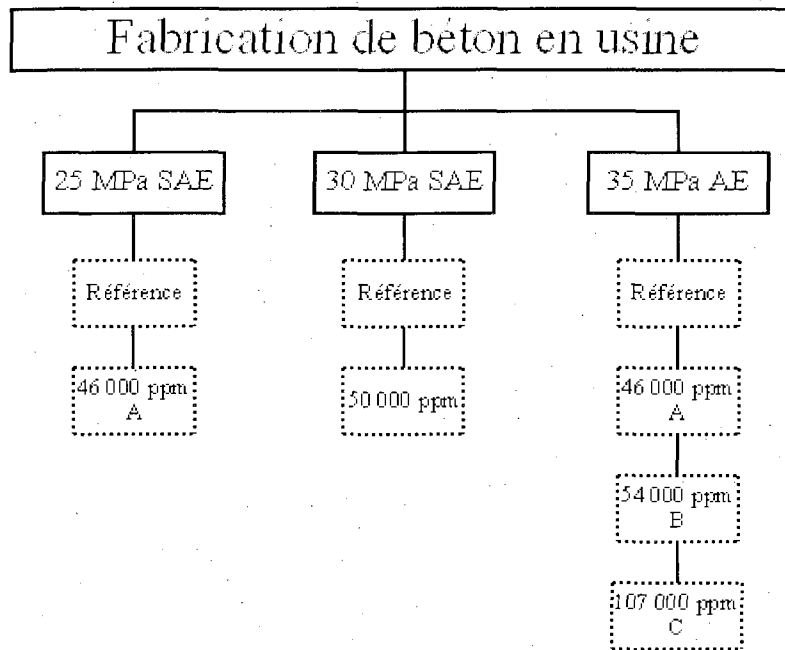


Figure 2.4 Identification de chaque mélange effectué en usine

3. MATÉRIAUX, MÉLANGES ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

3.1. Granulats

3.1.1. Granulats grossiers

Pour chacun des mélanges effectués en laboratoire, le diamètre maximal de la pierre est de 20 mm. La pierre concassée est un calcaire provenant de la carrière Graymont située à Marbleton au Québec. La teneur en eau des granulats n'est pas considérée dans les calculs de quantité des mélanges. En effet, avec une teneur en eau presque équivalente avec l'absorption, l'apport d'eau des granulats est considéré négligeable. La fiche technique des granulats grossiers est présentée en annexe A, alors que le tableau 3.1 et la figure 3.1 présentent la granulométrie et la courbe granulométrique de même que les fuseaux normalisés.

Tableau 3.1 Granulométrie du granulat grossier et fuseau normalisé

| Ouverture des tamis (mm) | 40 | 28 | 20 | 14 | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 |
|---------------------------------|-----|-----|--------|-------|-------|------|-----|------|
| Tamisat cumulé (%) | 100 | 100 | 100 | 90 | 58 | 5 | 1 | 1 |
| Fuseau normalisé (%) | — | — | 85-100 | 60-90 | 25-60 | 0-10 | 0-5 | — |

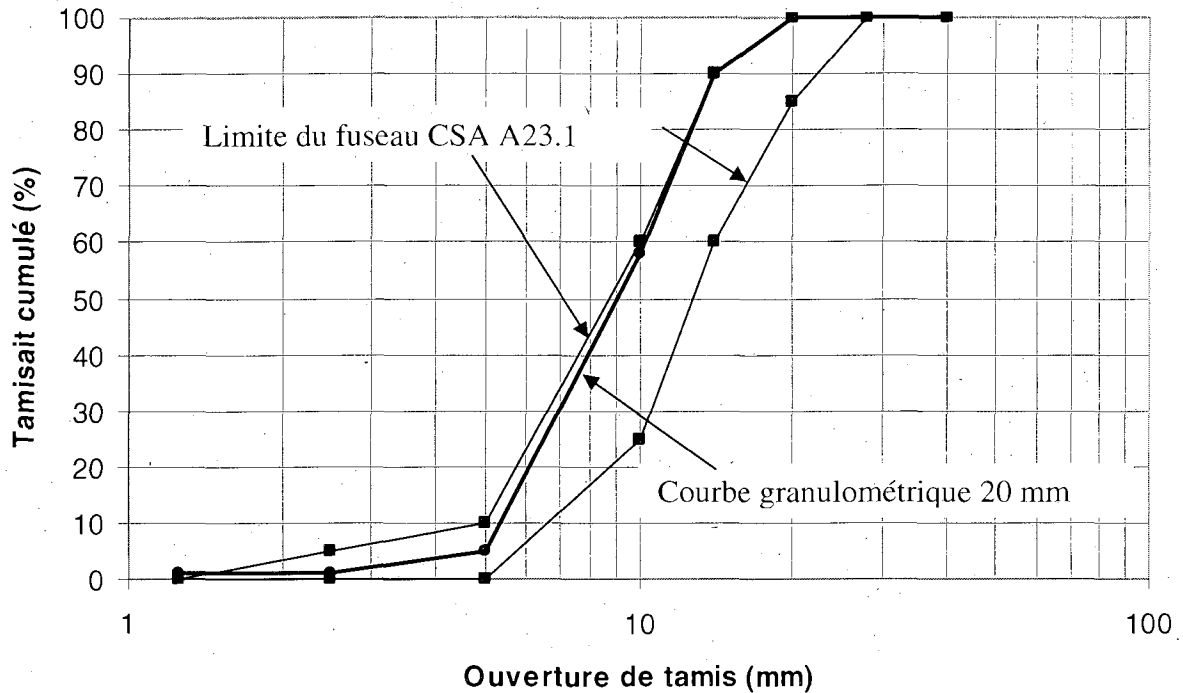


Figure 3.1 Courbe granulométrique du granulat grossier et fuseau normalisé

Le gros granulat utilisé pour les essais en usine est un calcaire ayant un diamètre maximal de 20 mm et provient de la carrière de Demix Agrégats à Saint-François. La granulométrie n'est pas disponible, mais respecte le fuseau normalisé.

3.1.2. Granulats fins

Tout comme le granulat grossier, le sable ne diffère pas d'un mélange à l'autre. Il s'agit d'un sable siliceux et feldspathique, provenant d'une carrière appartenant à la compagnie DJL, qui le récupère dans le banc Côté situé à Saint-François-Xavier. Entreposé dans des barils de métal d'une capacité de 200 litres, la teneur en eau du sable varie considérablement. Le fond du baril est toujours plus humide que le dessus, et il est nécessaire, avant chaque gâchée, de calculer la teneur en eau (w) afin de modifier les proportions du mélange. Au début de la séquence de malaxage, seul le sable est introduit dans le malaxeur et homogénéisé. De là, 500 g sont extraits et serviront au calcul de l'humidité (h) du matériau. Pour ce faire, le sable est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne l'état saturé superficiellement sec (SSS). La différence entre

la masse humide et la masse sèche du sable sert au calcul de l'humidité. Au plus souvent, la teneur en eau est supérieure à son absorption (abs.).

Cette donnée est spécifiée dans la fiche technique annexée (annexe A). Il faut multiplier l'humidité du sable ($h = w - abs.$) par le volume de sable total du mélange. Cette quantité, variant entre 0 et 0,5 kg pour une gâchée de 150 kg, représente la portion de sable qui est en fait de l'eau. Il faut donc soustraire cette quantité à l'eau et l'ajouter au sable. Il ne faut pas oublier d'ajouter à nouveau les 500 g de sable qui ont été extraits du malaxeur afin de faire cette correction. Le sable sec ne peut cependant plus être utilisé puisqu'il n'est plus représentatif du matériau.

La densité à l'état SSS du sable utilisé en laboratoire est de 2,67 et le module de finesse de 2,60. Le coefficient d'absorptivité varie légèrement entre la série d'essais effectuée à l'automne 2006 et celle effectuée à l'été 2007. Il s'agit de 1,3 % en 2006 et 1,4 % en 2007. Le tableau 3.2 et la figure 3.2 présentent la granulométrie et la courbe granulométrique de même que les fuseaux normalisés selon la norme CSA-A23.1.

Tableau 3.2 Granulométrie du granulat fin et fuseau normalisé

| Ouverture des tamis (mm) | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | 0,080 |
|--------------------------|-----|----------|----------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Tamisat cumulé (%) | 100 | 100 | 100 | 98 | 98 | 85 | 71 | 55 |
| Fuseau normalisé (%) | 100 | 95 – 100 | 80 – 100 | 50 – 90 | 25 – 65 | 10 – 35 | 2 – 10 | – |

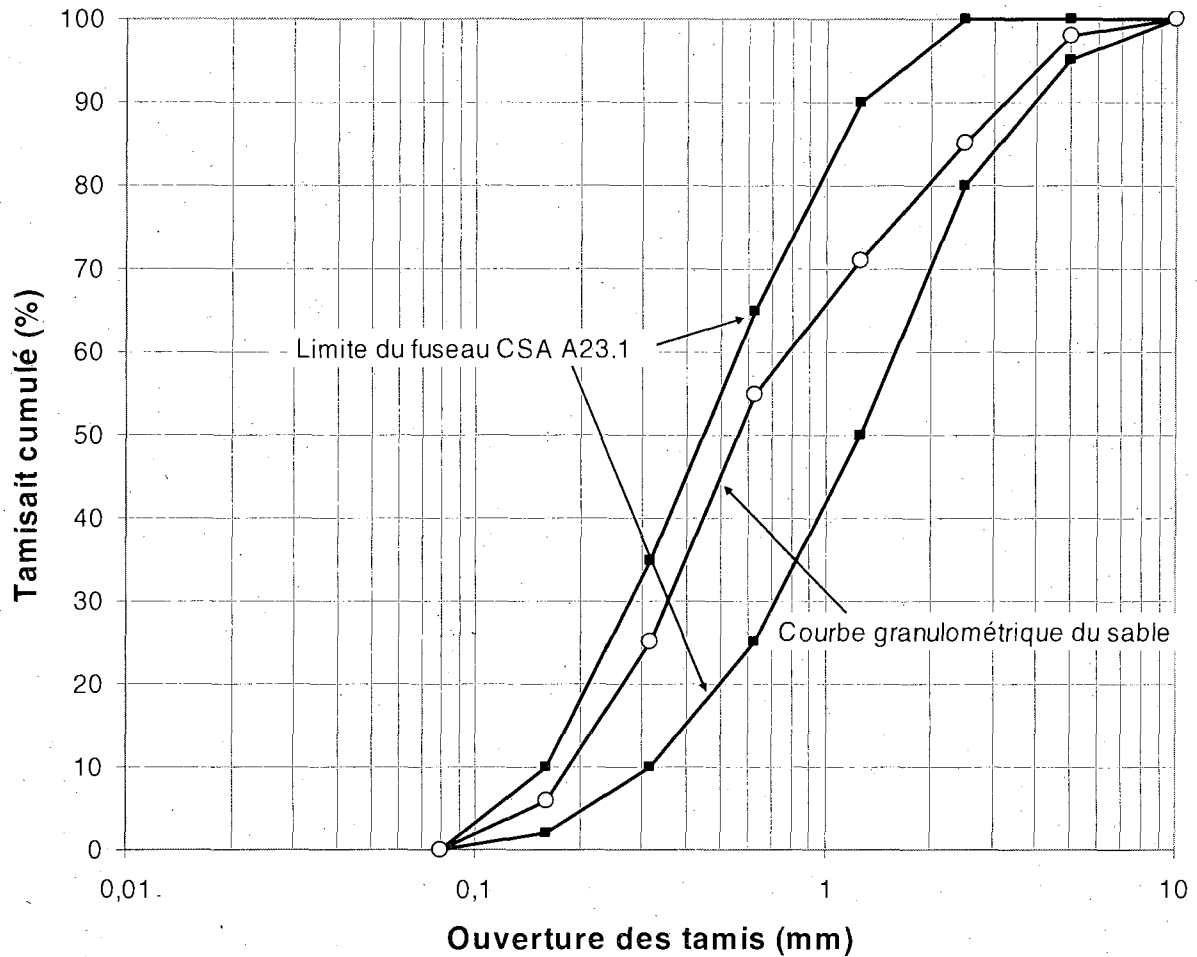


Figure 3.2 Courbe granulométrique du granulat fin et fuseau normalisé

3.2. Ciment

Les premiers essais en laboratoire (série 1, automne 2006) ont été effectués avec un ciment type GU provenant de Ciment St-Laurent. Afin d'être plus représentatif du marché actuel du béton prêt à l'emploi, la seconde série d'essais (série 2) a été effectuée avec un type GUB-S provenant également de Ciment St-Laurent. Ce second ciment est de type hydraulique composé binaire à usage général. Il contient du laitier de haut fourneau qui tend à augmenter l'imperméabilité du béton durci, protéger le béton contre les risques de gonflement en présence de granulats potentiellement réactifs aux alcalis du ciment et augmenter la résistance

du béton aux sulfates. Le tableau 3.3 présente la composition chimique des deux types de ciments utilisés, alors que le tableau 3.4 présente la composition minéralogique du ciment GU. À noter que la composition minéralogique des ciments composés n'est pas disponible.

Tableau 3.3 Composition chimique des ciments pour les essais en laboratoire

| Composition chimique (%) | Ciment type GU | Ciment type GUb-S |
|--------------------------------|----------------|-------------------|
| SiO ₂ | 20,2 | 21,6 |
| Al ₂ O ₃ | 4,7 | 4,9 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,1 | 2,8 |
| CaO | 63,2 | 59,9 |
| MgO | 2,0 | 2,8 |
| SO ₃ | 3,5 | 3,3 |
| Na ₂ O équ. | 0,83 | 0,84 |
| Perte au feu | 2,8 | 2,9 |
| Insolubles | 0,3 | 0,76 |

Tableau 3.4 Composition minéralogique du ciment GU

| Composition minéralogique (%) | Ciment type GU |
|-------------------------------|----------------|
| C ₃ S | 59,7 |
| C ₂ S | 12,8 |
| C ₃ A | 8,9 |
| C ₄ AF | 6,4 |

Lors des essais réalisés en usine, le ciment utilisé est le Gub-S disponible dans les silos de Demix Béton de LaSalle en date du 14 et 15 mai 2008. Bien qu'il ne soit pas possible d'obtenir les informations détaillées sur ce ciment, il est acceptable de prendre pour acquis que leur composition doit être comparable à un ciment GUb-S type.

Le plus important afin d'assurer la pertinence de l'étude est de réaliser toutes les gâchées d'une même série d'essais avec le même type de ciment, et idéalement, produit au même

moment à la cimenterie. Ainsi, les variations dues à la composition chimique du ciment sont exclues des facteurs à considérer.

3.3. Eau recyclée traitée

Au début de chaque série d'essais en laboratoire, un échantillon de 400 litres d'eau est puisé dans le bassin de stockage et d'homogénéisation de l'usine Demix Béton et est entreposé dans le laboratoire à l'Université de Sherbrooke. Dans le laboratoire, l'eau est conservée dans deux barils d'une capacité de 200 litres chacun. Des agitateurs à hélice assurent l'homogénéité du mélange et évitent la décantation des particules solides dans l'eau.

Pour la série 1, exécutée à l'automne 2006, l'eau recyclée avait une concentration initiale de 172 000 ppm. Un bris de matériel dans le laboratoire a causé la vidange d'un baril d'eau recyclée et il a été nécessaire de retourner chercher un second échantillon d'eau recyclée, alors concentré à 84 000 ppm. Pour la série 2, effectuée à l'été 2007, la concentration initiale de l'eau recyclée était de 40 000 ppm. Comme cette concentration n'est pas suffisante pour effectuer des gâchées à 50 000 et à 75 000 ppm, il est nécessaire de rendre l'eau plus concentrée. Pour ce faire, les moteurs sont arrêtés durant 24 heures afin de permettre une décantation des particules solides. Par la suite, une partie de l'eau (contenant peu de solides puisque ceux-ci ont décantés) est retirée du mélange. L'eau recyclée de la série 2 a donc été concentrée à 62 000 ppm, puis à 90 000 ppm suite à une seconde opération pour augmenter la concentration de l'eau. À noter que lorsque les agitateurs sont remis en marche suite à une décantation, il est important de s'assurer qu'aucun sédiment solide ne demeure collé au fond des barils.

Lors des mélanges effectués en usine, l'eau recyclée traitée est directement prélevée dans le bassin de stockage et d'homogénéisation du recycleur. Il suffit d'entrer dans un logiciel la densité désirée de l'eau recyclée (1,03 de densité correspond environ à une concentration de 50 000 ppm) et les proportions d'eau potable et d'eau recyclée se calculent par système informatisé. Le chapitre 4 porte entièrement sur les caractéristiques de l'eau recyclée traitée.

3.4. Adjuvants

3.4.1. Réducteurs d'eau

L'Eucon WR (WR) est un réducteur d'eau standard de type lignosulfonate qui permet d'introduire moins d'eau dans le mélange et d'obtenir des propriétés tout aussi satisfaisantes. Il permet une meilleure malléabilité et facilite la finition. Il augmente quelque peu la résistance et la durabilité des mélanges. De plus, il augmente légèrement le ressuage et diminue la perméabilité. Son dosage optimal est généralement 250 ml / 100 kg de ciment. Ce réducteur d'eau est utilisé dans les mélanges 25 MPa avec et sans air et pour les références de la série 30 MPa.

L'Eucon Dx (Dx) est un réducteur d'eau composé d'acide hydrocarboxyliques dont l'utilisation augmente surtout la résistance à la compression. Cette augmentation varie généralement entre 15 % et 25 % de la résistance obtenue sans l'utilisation du Dx. Il s'agit d'une solution à base d'eau qui contient un catalyseur produisant une meilleure hydratation du ciment. De plus, cet adjuvant est conseillé avec du Euclid Airextra puisque leur combinaison augmente l'entraînement d'air dans le béton. La fiche technique suggère une utilisation entre 150 et 250 ml / 100 kg de ciment, mais pour le projet, la dose maximale utilisée est de 400 ml / 100 kg de ciment. Les mélanges de 25 MPa avec et sans air entraîné contiennent du Eucon Dx, de même que la référence sans eau recyclée de 35 MPa avec air.

3.4.2. Retardateur de prise

L'Eucon 727 (727) est un réducteur d'eau et un retardateur de prise à base de sels dérivés d'acide hydroxycarboxylates. Son utilisation est surtout associée au béton dont le temps de prise est trop court, c'est pourquoi il est utilisé lors du bétonnage par temps chaud. De plus, il réduit l'utilisation de l'eau de 4 % à 8 % et augmente la résistance à la compression d'environ 15 % à 25 %. Il n'influence aucunement l'entraînement d'air et peut être utilisé dans des bétons avec de faibles rapports E/C. Enfin, il nécessite que de faibles doses, généralement

entre 50 et 250 ml / 100 kg de ciment. Cet adjuvant est incorporé à tous les mélanges contenant de l'eau recyclée dans le but de retarder la prise.

3.4.3. Superplastifiants

L'Eucon 37 (E37) permet de diminuer le rapport E/C et de fabriquer des bétons ayant une meilleure résistance. Il est également considéré comme un super plastifiant à base de naphthalène. L'avantage de son utilisation est que bien que le béton soit plus résistant et contienne moins d'eau, il conserve une bonne malléabilité. Il est compatible et suggéré avec les agents entraîneurs d'air et peut être utilisé dans presque tous les types de béton. Son dosage varie énormément soit entre 375 et 1125 ml / 100 kg de ciment. Pour l'utilisation du E37 dans les bétons contenant de l'eau recyclée, le dosage se situe environ à 750 ml / 100 kg de ciment. Le Eucon 37 est utilisé uniquement dans les mélanges de 35 MPa avec air entraîné afin d'apporter une alternative à l'utilisation du Plastol 341.

Le Plastol 341 (p341) est à la fois considéré comme un réducteur à moyenne portée et un super plastifiant à base de polycarboxylate. Il améliore principalement les caractéristiques finales du mélange, entre autres en augmentant la malléabilité et sa maintenance dans le temps. Par le fait même, il allonge quelque peu le temps de prise. Son dosage varie vraiment en fonction du béton fabriqué, mais dans le cadre de ces travaux, les doses utilisées se situent entre 300 et 500 ml / 100 kg de ciment. Le Plastol 341 est utilisé dans les mélanges de 30 MPa sans air et de 35 MPa avec air, puisque le Eucon Dx n'a pas suffisamment de portée pour ces deux mélanges.

3.4.4. Agent entraîneur d'air

Composé d'acide sulfonates, l'Eucon Airextra (AIR) est le seul entraîneur d'air utilisé dans les bétons avec de l'eau recyclée pour ces travaux. Son ajout au béton crée un réseau de bulles d'air microscopiques et stable. Généralement, l'espacement entre les bulles d'air varie autour de 220 μm alors que la norme CSA demande une distance inférieure ou égale à 230 μm . L'entraînement d'air facilite la finition du béton et augmente l'affaissement du mélange. De

plus, il intervient en minimisant le ressuage et la ségrégation. Par temps froid, les bétons contenant un agent entraîneur d'air réagissent mieux aux cycles de gel et dégel et sont plus durables pour tout autre environnement. L'Airextra est recommandé avec des superplastifiants dans les mélanges à haute performance. Dans le cadre de cette recherche, il est évidemment ajouté uniquement aux mélanges avec air entraîné, soit le 25 MPa et le 35 MPa.

3.5. Formulation des mélanges

Tout d'abord, il est à noter que toutes les formulations de mélange sont ajustées à partir de la masse volumique mesurée à 10 minutes. Pour les bétons d'usine, la masse volumique indiquée dans le tableau correspond à la masse volumique initiale du mélange, c'est-à-dire avant l'ajout d'eau lorsque nécessaire. En laboratoire, les formulations de base sont les mêmes pour les séries 1 et 2. Ces formulations ont été établies par l'usine Demix Béton à titre de formules références fréquemment employées dans la production commerciale. Chaque série débute par une référence à 0 ppm, et est suivie d'un béton identique avec de l'eau à 50 000 ppm et parfois à 75 000 ppm. Par la suite, l'adjuvantation varie afin d'obtenir le béton désiré.

Les formulations des mélanges en usine sont celles utilisées habituellement par Demix Béton et les doses d'adjuvants se trouvent considérablement diminuées étant donné la plus grande énergie de malaxage en usine. Comparativement aux bétons de laboratoire où aucune modification n'est apportée au mélange après le contact eau - ciment, les bétons fabriqués en usine sont ajustés dépendamment des propriétés initiales du béton frais. Ainsi, dans les tableaux de formulation, les volumes d'eau et d'adjuvants sont inscrits en deux parties : x + y. La première dose est ajoutée lors du malaxage initial du béton dans l'usine, alors que la seconde dose est ajoutée directement dans la bétonnière après avoir effectué les premiers essais. À noter qu'une dose ajoutée directement à même la bétonnière ne se mélange pas aussi efficacement et n'a habituellement pas autant d'impact que les ajouts faits lors de la fabrication.

Enfin, l'abréviation Eau Rliq présentée dans les tableaux suivants indique la portion liquide de l'eau recyclée. Les particules contenues dans l'eau recyclée sont comptabilisées sous la dénomination Solides.

3.5.1. 25 MPa sans air entraîné

3.5.1.1. Bétons de laboratoire

Tableau 3.5 Formulation des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 1

| L-25SAE-1 | Référence | 25-SAE-50 | 25-SAE-50A | 25-SAE-50B |
|----------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Solides (ppm) | 0 | 50 000 | 50 000 | 50 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 184 | 80 | 81 | 139 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 101 | 101 | 47 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 9 | 9 | 9 |
| Ciment (kg/m ³) | 264 | 265 | 264 | 268 |
| Sable (kg/m ³) | 983 | 982 | 977 | 989 |
| Pierre (kg/m ³) | 940 | 940 | 937 | 951 |
| WR (ml/100kg C) | 250 | 250 | 0 | 0 |
| DX (ml/100kg C) | 0 | 0 | 250 | 400 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 100 | 100 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 371 | 2 377 | 2 369 | 2 403 |
| E/L _{app} | 0,70 | 0,72 | 0,72 | 0,73 |
| E/L _{réel} | | 0,68 | 0,69 | 0,69 |

Tableau 3.6 Formulation des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 2

| L-25SAE-2 | Référence | 25-SAE-50 | 25-SAE-75 | 25-SAE-50A | 25-SAE-75A |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Solides (ppm) | 0 | 50 000 | 75 000 | 50 000 | 75 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 186 | 40 | 41 | 40 | 41 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 148 | 148 | 149 | 148 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 10 | 15 | 10 | 15 |
| Ciment (kg/m ³) | 262 | 266 | 267 | 265 | 267 |
| Sable (kg/m ³) | 981 | 985 | 983 | 982 | 981 |
| Pierre (kg/m ³) | 932 | 945 | 948 | 942 | 950 |
| WR (ml/100kg C) | 250 | 250 | 250 | 0 | 0 |
| DX (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 400 | 400 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 361 | 2 394 | 2 402 | 2 388 | 2 402 |
| E/L _{app} | 0,71 | 0,75 | 0,77 | 0,75 | 0,77 |
| E/L _{réel} | | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |

Pour la série 25 MPa SAE (tableaux 3.5 et 3.6), très peu d'adjuvants différents sont utilisés. Pour les trois références, soit à 0, 50 000 et 75 000 ppm, le réducteur d'eau WR est le seul adjuvant. Lorsque l'eau recyclée est incorporée, il faut un réducteur d'eau ayant une plus grande portée, c'est pourquoi l'Eucon Dx est employé. Lors de la série 1, une dose de 250 ml / 100 kg de ciment n'a pas suffi à redonner au mélange un affaissement acceptable, c'est pourquoi les autres bétons adjuvés contiennent tous 400 ml / 100 kg de ciment d'Eucon Dx. Comme dans tous les mélanges avec eau recyclée, une faible dose d'Eucon 727 assure un temps de prise acceptable.

3.5.1.2. Bétons d'usine

Tableau 3.7 Formulation des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 3

| U-25SAE-3 | Référence | 25-SAE-46A |
|----------------------------------|-------------|-------------|
| Concentration visée (ppm) | 0 | 50 000 |
| Concentration réelle (ppm) | 0 | 46 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 175 + 0,95 | 92 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 77 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 4 |
| Ciment (kg/m ³) | 256 | 255 |
| Sable (kg/m ³) | 980 | 988 |
| Pierre (kg/m ³) | 901 | 905 |
| WR (ml/100kg C) | 244 | 221 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 50 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 312 | 2 321 |
| E/L_{app} | 0,69 | 0,68 |
| E/L_{réel} | | 0,66 |

En usine, la fabrication de béton 25 MPa SAE contenant de l'eau recyclée est habituelle et les propriétés du mélange avec eau recyclée sont très peu modifiées. Afin de s'assurer que le mélange ait un temps de prise suffisamment long, principalement à titre préventif, une faible dose de retardateur de prise est ajoutée, soit 50 ml / 100kg.

3.5.2. 25 MPa avec air entraîné

3.5.2.1. Bétons de laboratoire

Les mélanges 25 MPa AE (tableaux 3.8 et 3.9) sont adjuvantés de la même façon que les 25 MPa SAE en ce qui a trait au réducteur d'eau et au retardateur de prise. Par contre, comme ces mélanges contiennent de l'air entraîné, la dose de l'agent entraîneur d'air varie beaucoup. Tout d'abord, une première référence, à 0 ppm, contient seulement 20 ml d'Airextra pour 100 kg de ciment (20 ml / 100 kg) et ne permet pas l'obtention du volume d'air désiré. Une seconde référence, contenant 70 ml / 100 kg permet d'obtenir un volume d'air suffisant. Par la

suite, les quantités d'Airextra sont augmentées considérablement, voire jusqu'à 200 ml / 100 kg, afin de bien observer les effets de l'agent d'entraîneur d'air sur les bétons avec eau recyclée.

Tableau 3.8 Formulation des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 1

| L-25AE-1 | Référence | 25-AE-50 | 25-AE-75 | 25-AE-50A | 25-AE-50B | 25-AE-50C | 25-AE-50D | 25-AE-75A |
|----------------------------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Solides (ppm) | 0 | 50 000 | 75 000 | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 75 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 174 | 82 | 41 | 128 | 131 | 44 | 41 | 42 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 95 | 135 | 44 | 44 | 128 | 124 | 133 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 8 | 12 | 8 | 8 | 8 | 8 | 12 |
| Ciment (kg/m ³) | 274 | 278 | 276 | 281 | 278 | 278 | 269 | 270 |
| Sable (kg/m ³) | 921 | 930 | 918 | 948 | 931 | 936 | 906 | 898 |
| Pierre (kg/m ³) | 944 | 959 | 950 | 971 | 958 | 959 | 928 | 931 |
| AEA (ml/100kg C) | 20 | 20 | 20 | 20 | 30 | 40 | 60 | 60 |
| WR (ml/100kg C) | 250 | 250 | 250 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DX (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 250 | 250 | 250 | 400 | 400 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 313 | 2 352 | 2 332 | 2 380 | 2 350 | 2 353 | 2 276 | 2 286 |
| E/L _{ap} | 0,64 | 0,67 | 0,69 | 0,64 | 0,66 | 0,65 | 0,64 | 0,69 |
| E/L _{réel} | | 0,64 | 0,64 | 0,61 | 0,63 | 0,62 | 0,61 | 0,65 |

Tableau 3.9 Formulation des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 2

| L-25AE-2 | Référence 1 | Référence 2 | 25-AE-50 | 25-AE-75 |
|----------------------------------|-------------|-------------|----------|----------|
| Solides (ppm) | 0 | 0 | 50 000 | 75 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 175 | 168 | 66 | 49 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 0 | 113 | 131 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 0 | 9 | 15 |
| Ciment (kg/m ³) | 275 | 263 | 280 | 282 |
| Sable (kg/m ³) | 933 | 893 | 941 | 945 |
| Pierre (kg/m ³) | 947 | 907 | 964 | 974 |
| WR (ml/100kg C) | 250 | 250 | 250 | 250 |
| AIR ml/100kg C) | 20 | 70 | 20 | 20 |
| DX (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 330 | 2 231 | 2 373 | 2 396 |
| E/L _{app} | 0,64 | 0,64 | 0,67 | 0,69 |
| E/L _{réel} | | | 0,64 | 0,64 |

| L-25AE-2 | 25-AE-50A | 25-AE-50B | 25-AE-50C | 25-AE-50D | 25-AE-75A | 25-AE-75B |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Solides (ppm) | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 75 000 | 75 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 65 | 101 | 100 | 96 | 48 | 63 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 112 | 71 | 71 | 69 | 130 | 112 |
| Solides (kg/m ³) | 14 | 9 | 9 | 9 | 9 | 14 |
| Ciment (kg/m ³) | 277 | 270 | 269 | 258 | 280 | 274 |
| Sable (kg/m ³) | 932 | 910 | 905 | 869 | 928 | 918 |
| Pierre (kg/m ³) | 955 | 933 | 928 | 891 | 964 | 946 |
| WR (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AIR ml/100kg C) | 60 | 100 | 130 | 200 | 60 | 130 |
| DX (ml/100kg C) | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 727 (ml/100kg C) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 255 | 2 294 | 2 282 | 2 192 | 2 359 | 2 327 |
| E/L _{app} | 0,69 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,69 |
| E/L _{réel} | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 |

3.5.3. 30 MPa sans air entraîné

3.5.3.1. Bétons de laboratoire

Les mélanges adjuvantés de la série 30 MPa SAE (tableau 3.10) contiennent du Plastol 341 plutôt que de l'Eucon Dx afin de permettre une meilleure ouvrabilité des mélanges. Le temps de prise est souvent trop court, d'où l'ajout en laboratoire de doses importantes d'Eucon 727. En ce qui concerne le mélange fabriqué avec de l'eau concentrée à 75 000 ppm, la dose de Plastol 341 (600 ml / 100 kg) semble légèrement trop élevée, mais a permis de comprendre le lien direct entre l'affaissement et le dosage en superplastifiant.

En usine (tableau 3.11), les propriétés du mélange de 30 MPa SAE avec eau recyclée sont semblables à la référence ne contenant pas d'eau recyclée. Seule une dose minime de retardateur de prise (50 ml / 100 kg) a suffi à reproduire un béton de qualité.

Tableau 3.10 Formulation des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 2

| L-30SAE-2 | Référence | 30-SAE- 50 | 30-SAE- 75 | 30-SAE- 50A | 30-SAE- 50B | 30-SAE- 50C | 30-SAE- 75A |
|----------------------------------|-----------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Solides (ppm) | 0 | 50 000 | 75 000 | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 75 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 190 | 109 | 63 | 106 | 109 | 109 | 68 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 82 | 127 | 81 | 79 | 78 | 119 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 |
| Ciment (kg/m ³) | 292 | 291 | 292 | 289 | 289 | 288 | 287 |
| Sable (kg/m ³) | 964 | 947 | 949 | 943 | 943 | 940 | 930 |
| Pierre (kg/m ³) | 952 | 945 | 952 | 941 | 941 | 939 | 934 |
| WR (ml/100kg C) | 250 | 250 | 250 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| Plastol341 (ml/100kgC) | 0 | 0 | 0 | 300 | 300 | 400 | 650 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 398 | 2 464 | 2 398 | 2 370 | 2 371 | 2 364 | 2 353 |
| E/L _{app} | 0,65 | 0,68 | 0,70 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,70 |
| E/L _{réel} | | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 |

3.5.3.2. Bétons d'usine

Tableau 3.11 Formulation des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 3

| U-30SAE-3 | Référence | 30-SAE-46A |
|----------------------------------|------------|------------|
| Concentration visée (ppm) | 0 | 50 000 |
| Concentration réelle (ppm) | 0 | 44 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 176 + 2,84 | 128 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 47 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 4 |
| Ciment (kg/m ³) | 295 | 292 |
| Sable (kg/m ³) | 976 | 971 |
| Pierre (kg/m ³) | 900 | 909 |
| WR (ml/100kg C) | 242 | 241 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 59 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 347 | 2 351 |
| E/L _{app} | 0,61 | 0,61 |
| E/L _{réel} | | 0,60 |

3.5.4. 35 MPa air entraîné

3.5.4.1. Bétons de laboratoire

Tableau 3.12 Formulation des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 2

| L-35AE-2 | Référence | 35-AE-50A | 35-AE-50B | 35-AE-50C | 35-AE-50D | 35-AE-50E |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Solides (ppm) | 0 | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 50 000 | 50 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 181 | 96 | 96 | 105 | 104 | 101 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 71 | 72 | 78 | 77 | 76 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 14 | 9 | 10 | 10 | 9 |
| Ciment (kg/m ³) | 406 | 374 | 376 | 410 | 406 | 398 |
| Sable (kg/m ³) | 690 | 627 | 631 | 688 | 682 | 668 |
| Pierre (kg/m ³) | 953 | 878 | 883 | 963 | 954 | 935 |
| Dx (ml/100kg C) | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 727 (ml/100kg C) | 0 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| Eucon37 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0 | 0 | 750 | 0 |
| Plastol341 (ml/100kgC) | 0 | 550 | 450 | 400 | 0 | 550 |
| Air Extra (ml/100kg C) | 200 | 400 | 200 | 30 | 200 | 40 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 230 | 2 060 | 2 067 | 2 254 | 2 233 | 2 187 |
| E/L _{app} | 0,45 | 0,48 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 |
| E/L _{réel} | | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |

3.5.4.2. Bétons d'usine

Tableau 3.13 Formulation des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 3

| U-35AE-3 | Référence | 35-AE-46 | 35-AE-54A | 35-AE-107A |
|----------------------------------|-----------|----------|-----------|------------|
| Concentration visée (ppm) | 0 | 50 000 | 50 000 | 110 000 |
| Concentration réelle (ppm) | 0 | 46 000 | 54 000 | 107 000 |
| Eau potable (kg/m ³) | 166 + 8 | 126 + 6 | 99 | 31 |
| Eau Rliq. (kg/m ³) | 0 | 42 | 63 | 120 |
| Solides (kg/m ³) | 0 | 2 | 3 | 14 |
| Ciment (kg/m ³) | 409 | 408 | 410 | 404 |
| Sable (kg/m ³) | 756 | 760 | 752 | 773 |
| Pierre (kg/m ³) | 950 | 949 | 961 | 934 |
| DX (ml/100kg C) | 227 | 220 | 220 | 229 |
| 727 (ml/100kg C) | 61 | 67 | 67 | 62 |
| Eucon37 (ml/100kg C) | 0 | 0 | 0+122 | 0 + 186 |
| Air Extra (ml/100kg C) | 155 + 31 | 153 + 31 | 153 + 24 | 156 + 19 |
| Masse vol. (kg/m ³) | 2 281 | 2 287 | 2 288 | 2 276 |
| E/L _{app} | 0,43 | 0,43 | 0,40 | 0,41 |
| E/L _{réel} | | 0,43 | 0,39 | 0,37 |

Le mélange 35 MPa AE (tableau 3.12) a nécessité beaucoup d'ajustement quant aux formulations d'adjuvants. Tout d'abord, il n'est pas possible de fabriquer un béton de référence à 50 000 ppm en utilisant la même adjuvantation que la référence à 0 ppm. Le mélange produit est alors granuleux et présente un affaissement pratiquement nul. Le dosage en Eucon 727 est demeuré constant, car le temps de prise a été jugé acceptable dès le premier mélange. Le Plastol 341, en combinaison avec l'Airextra, est plus difficile à doser. Les mélanges adjuvantés 3 et 4 démontrent qu'une faible dose d'agent entraîneur d'air suffit lorsque le Plastol 341 est utilisé. Enfin, l'Eucon 37 est présenté comme une alternative au Plastol 341. Ce superplastifiant doit être utilisé avec une dose importante d'Airextra (200 ml / 100 kg de ciment) mais permet d'obtenir des bétons ayant des propriétés adéquates.

En usine (tableau 3.13), le mélange de 35 MPa AE contenant de l'eau concentrée à 50 000 ppm est relativement facile à fabriquer. Le Plastol 341 n'est pas utilisé, et des doses d'Eucon 37 presque sept fois plus faibles qu'en laboratoire sont suffisantes pour obtenir l'affaissement

désiré. Étant donné les résultats satisfaisants à 50 000 ppm, des essais avec de l'eau concentrée à 130 000 ppm ont été réalisés. Pour ce faire, la dose d'Eucon 37 est légèrement augmentée (180 ml / 100 kg). Le but visé en utilisant une eau très concentrée est de voir le comportement à l'extrême du béton de ciment contenant 100 % d'eau recyclée.

3.6. Rapport Eau / Liant

Les bétons fabriqués à partir d'eau recyclée se caractérisent par deux rapports E/L différents. Tout d'abord, le rapport E/L réel. Il exclut la masse des fines particules du mélange.

$$\frac{E}{L}_{réel} = \frac{E_{aq} + E_{Rliq}}{Liant}$$

Où E_{aq} correspond à l'eau provenant de l'aqueduc et E_{Rliq} correspond à la portion d'eau recyclée.

Le rapport E/L apparent quant à lui considère l'apport de fines particules provenant de l'eau recyclée. Il est donc toujours supérieur de 0,3 à 0,5 par rapport au E/L réel.

$$\frac{E}{L}_{app} = \frac{E_{aq} + E_{Rliq} + solides}{Liant}$$

Lors de la série 1, effectuée à l'automne 2006, il n'y a eu aucune constance dans les rapports E/L. La série 2 a cependant été effectuée en conservant un rapport E/L réel constant afin de faciliter l'analyse des résultats.

Afin d'être cohérent lors de la formulation des mélanges, la quantité de particules fines apportées par l'eau recyclée est soustraite au sable. Cette quantité est cependant presque négligeable. Par contre, comme elle est initialement comptabilisée dans la quantité d'eau totale et qu'en réalité elle est une partie solide plutôt que liquide, elle doit à nouveau être ajoutée à l'eau de l'aqueduc. Il est donc normal d'observer dans les tableaux de formulations

que la quantité d'eau potable additionnée à la quantité d'eau recyclée liquide pour des bétons avec eau recyclée équivaut à la quantité d'eau potable de la référence.

En laboratoire, les deux mêmes rapports E/L existent. Cependant, aucune correction n'est apportée au mélange afin de compenser la partie solide de l'eau recyclée. La quantité de sable n'est pas non plus compensée en fonction de la portion solide de l'eau recyclée. Pour cette raison, l'écart entre le E/L réel et le E/L apparent n'est pas aussi important que pour les bétons fabriqués en laboratoire. Dans les tableaux de formulations, si les quantités introduites dans le malaxeur avaient été exactement les mêmes pour chaque béton de même classe nominale, l'addition de l'eau potable, de l'eau recyclée et des solides aurait alors donné la même quantité d'eau que la référence sans eau recyclée.

3.7. Séquence de malaxage en laboratoire

Le malaxeur utilisé pour toutes les gâchées en laboratoire est un malaxeur à toupie de type Monarch à vitesse variable. Sa capacité est de 100 litres et sa vitesse peut varier entre 0 et 20 tours / minute.

Bien que la provenance des matériaux et que les quatre formulations des mélanges demeurent constantes, les résultats des mélanges de béton en laboratoire peuvent varier beaucoup. La séquence de malaxage joue un rôle important dans la réussite d'une gâchée de béton. L'ordre dans lequel les matériaux sont incorporés dans le malaxeur de même que le temps de malaxage, les temps d'arrêt et la vitesse de rotation sont des facteurs qui modifient les propriétés du béton produit. Afin d'obtenir des résultats fiables et ainsi pouvoir comparer les différents mélanges, la séquence de malaxage doit être élaborée avant de débiter les gâchées et doit demeurer la même tout au long des essais.

Pour les gâchées effectuées au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke, la séquence de malaxe est la suivante (à noter que les vitesses varient de ± 1 tour/minute) :

1. Humidifier les parois et les pales du malaxeur et laisser égoutter afin d'éviter un surplus d'eau.
2. Mettre le sable dans le malaxeur et mélanger à environ 15 tr/min durant 1 minute. Le sable est ainsi homogénéisé. Recouvrir l'ouverture du malaxeur d'une serviette humide, mais pas mouillée.
3. Prélever 500 g de sable et calculer son humidité afin d'ajuster la proportion d'eau qui doit être mise dans le malaxeur en fonction de l'apport d'eau du sable.
4. Ajouter la pierre au malaxeur. Mélanger durant 1 à 3 minutes à environ 10 tr/min en changeant l'angle d'inclinaison du malaxeur. Au cours de cette étape, il est important de s'assurer que le sable et la pierre commencent à se mélanger. Il faut éviter que le sable soit dans le fond du malaxeur et la pierre près du rebord.
5. Ajouter la moitié de l'eau du mélange. Cette eau ne contient pas d'eau potable pour les mélanges avec eau recyclée.
6. Malaxer durant 1 minute à environ 17 tr/min.
7. Pour les mélanges contenant un agent entraîneur d'air, diminuer la vitesse de rotation à 6 tr/min et incorporer la dose de l'adjuvant à l'aide d'une seringue. Vider le contenu de la seringue en dose de quelques millilitres et à différents endroits dans le malaxeur. Éviter de mettre de l'agent entraîneur d'air sur les parois ou les pales du malaxeur, viser directement le mélange.
8. En laissant le malaxeur tourner à 6 tr/min, ajouter le ciment. Dès que le ciment est incorporé, couvrir avec une plaque rigide et malaxer à 17 tr/min durant 30 secondes. La plaque rigide retient la poussière de ciment à l'intérieur du malaxeur.
9. Ajouter le reste de l'eau, soit le reste de l'eau recyclée, l'eau de l'aqueduc et les autres adjuvants qui ont préalablement été mélangés à cette eau. Démarrer le chronomètre.
10. Laisser malaxer 3 minutes à 17 tr/min.
11. Cesser de malaxer durant une minute. Couvrir le malaxeur avec une serviette humide.
12. Repartir le malaxeur pour 6 minutes à une vitesse constante de 17 tr/min.
13. À 10 minutes sur le chronomètre, débiter la première série de tests (se référer à la section 3.9 concernant les essais effectués). Prélever une éprouvette cylindrique pour l'essai de stabilité du réseau de bulles d'air. Nettoyer les instruments.

14. À 20 minutes, effectuer une seconde série de tests. Par la suite, prendre 9 éprouvettes cylindriques qui seront utilisés pour les essais de résistance à la compression. Nettoyer les instruments.
15. À 50 minutes, effectuer une troisième série de tests. Par la suite, prélever les échantillons pour le temps de prise initial, les essais de résistance aux cycles de gel - dégel et les essais de résistance à l'écaillage (si nécessaire). Nettoyer les instruments.
16. À 80 minutes, effectuer la dernière série de tests. Prélever une éprouvette cylindrique pour l'essai de stabilité du réseau de bulles d'air. Nettoyer les instruments, le malaxeur et le laboratoire.

3.8. Déroulement des essais en usine

Tous les essais en usine ont lieu à l'usine Demix Béton de l'arrondissement LaSalle. Les essais en usine constituent une validation des résultats obtenus en laboratoire. Il s'agit en fait d'utiliser l'expérience acquise au laboratoire afin de fabriquer de meilleurs bétons commerciaux contenant de l'eau recyclée.

Les essais en usine se sont déroulés les 14 et 15 mai 2008. Afin d'avoir le plus d'expertise possible, des représentants de Ciment Saint-Laurent, Demix Béton et Euclid Canada étaient présents sur place.

3.9. Description des tests et essais

Au cours d'une gâchée de béton en laboratoire, cinq paramètres sont mesurés à quatre reprises, soit après 10, 20, 50 et 80 minutes de malaxage du béton. Les essais sont l'affaissement, la masse volumique, la teneur en air et la température. Des échantillons sont également prélevés pour faire les essais de résistance à la compression, de même que pour trouver le temps de prise initiale. Pour les mélanges de 35 MPa avec air entraîné, des essais supplémentaires pour évaluer la durabilité ont été effectués, soient les essais de résistance aux cycles de gel - dégel et à l'écaillage.

En usine, les essais suivants ont été réalisés initialement, à 40 et à 70 minutes : affaissement, masse volumique, teneur en air et température. Des éprouvettes ont été prélevées initialement et à 70 minutes afin d'observer l'espacement des bulles d'air. Pour effectuer ces essais, le béton est prélevé directement dans les bétonnières. Des éprouvettes cylindriques sont prélevées afin d'effectuer les essais de résistance à la compression à un, sept et 28 jours. Pour le mélange de 35 MPa avec air entraîné, les essais de durabilité sont également effectués.

Tel qu'expliqué lors de la présentation des formulations, il est fréquent en usine d'ajouter de l'eau ou des adjuvants à même la bétonnière lorsque le mélange ne présente pas les caractéristiques initiales voulues. Ainsi, une première série d'essais permet de fixer les ajustements, et une seconde série suit quelques minutes après l'ajout d'eau ou d'adjuvant. Par la suite, les deux autres échantillonnages (40 et 70 minutes) sont effectués au temps le plus exact possible.

3.9.1. Affaissement

Les essais d'affaissement ont été réalisés tel que préconisé dans la norme CSA A23.2-5C.

L'équipement requis pour réaliser cet essai est le suivant :

- Une plaque carrée suffisamment large pour contenir le béton.
- Un cône d'affaissement : il s'agit d'un moule métallique conique de 300 mm de hauteur et de 200 mm de diamètre à sa base et de 100 mm à son sommet. À noter qu'un cône inversé de plus petite taille est placé au niveau du sommet du montage afin de permettre la correcte introduction du béton.
- Une tige d'acier de 16 mm de diamètre et de longueur comprise entre 450 et 600 mm avec une extrémité arrondie.

L'essai commence par une humectation des instruments à l'aide du jet d'eau. Par la suite, le cône est placé verticalement sur la plaque (avec le petit cône qui chapeaute) qui doit être solide, plane et non absorbante. Le cône est alors rempli en trois couches ayant à peu près le même volume. La première couche doit avoir une hauteur de 70 mm après pilonnage, quant à

la deuxième sa hauteur doit être égale à la moitié du cône environ (soit 160 mm), et la troisième remplira complètement le cône avec un léger excès. Chaque couche est pilonnée 25 fois. Après pilonnage et arasement de la dernière couche, le cône est soulevé lentement de 300 mm en 5 secondes et le béton demeure en place ou s'affaisse selon sa consistance. L'affaissement est défini comme étant la différence de hauteur entre le cône et l'arase supérieure du béton.

À noter que pour l'étude de l'influence des eaux recyclées, un affaissement de 90 ± 10 mm est visé à 10 minutes pour les mélanges 25 MPa avec et sans air et 30 MPa sans air. Lors de la fabrication des mélanges 35 MPa avec air, pour obtenir un affaissement plus élevé (idéalement supérieur à 60 mm) en fin de malaxage, un affaissement de 150 ± 10 mm (120 ± 20 mm en usine) est visé à 10 minutes. L'objectif est de fabriquer un béton malléable, mais pas nécessairement fluide.

3.9.2. Masse volumique

La détermination de la masse volumique (en kg / m^3) est normalisée dans le document CSA A23.2-6C. La masse volumique est calculée comme suite aux données prises en laboratoire afin d'ajuster les formulations en quantité saturée superficielle sèche (SSS) par mètre cube de béton. Il s'agit simplement de peser le béton et de diviser cette masse par le volume du contenant. Il faudra prendre soin de consolider le béton avant sa pesée soit en pilonnant (3 x 20 coups) ou en réalisant une vibration interne avant l'arase de la surface. Comme le contenant est pesé à chaque série de tests, il est possible de déterminer la masse volumique du béton à 10, 20 50 et 80 minutes (10, 40 et 70 minutes en usine). Pour les calculs de masse SSS, seule la masse volumique à 10 minutes est utilisée.

3.9.3. Teneur en air

Afin d'évaluer la teneur en air, deux méthodes CSA sont disponibles : la méthode pressiométrique CSA A23.2-4C et la méthode volumétrique CSA A23.2-7C. Cette dernière, qui convient à tous types de granulat, consiste à enlever l'air contenu dans un volume de béton

en l'agitant en présence d'un excès d'eau. Pour les essais effectués sur l'eau recyclée, la méthode pressiométrique est employée car elle est plus rapide et tout aussi efficace.

Avant de commencer l'essai, il convient de faire la tare du récipient (de contenance comprise entre 7,00 et 7,03 litres) afin de réaliser en même temps l'essai qui permettra de déterminer la masse volumique du béton. Par la suite, le contenant devra être rempli en trois couches égales pilonnées à chaque fois de 25 coups et complétées de quelques coups de maillet en périphérie dans le but de bien mettre en place le béton. L'utilisation d'une barre d'arasement permettra de réaliser une arase correcte et une éponge sert à nettoyer le récipient au niveau de son pourtour. De cette manière, l'adhérence est assurée entre le contenant et son couvercle. Une fois ce dernier clos, de l'eau est injectée par les orifices prévus à cet effet en tête afin de saturer la matière en surface. Par la suite, un pompage permet d'introduire de l'air dans les vides et une évacuation de pression permettra leur évaluation par lecture sur le nanomètre (à noter qu'un tapotage léger de l'instrument stabilise la lecture).

La pression que l'on applique comprime l'air contenu dans l'échantillon de béton y compris l'air contenu dans les pores des granulats. C'est pourquoi cette méthode ne convient pas à certains types de granulats légers ou de matériaux poreux.

3.9.4. Température

La température permet parfois d'expliquer certaines anomalies dans les résultats des bétons. Elle exerce même une grande influence sur les propriétés du béton frais et durci ; il est donc souhaitable de la noter à chaque série d'essais. Pour ce faire, un thermomètre digital avec une précision de $\pm 0,5$ °C est introduit dans le béton qui a préalablement est utilisé pour le calcul de l'affaissement et ce jusqu'à ce que la lecture devienne stable. Il convient de mettre en relief que la portion sensible du thermomètre doit être immergée d'au moins 75 mm dans un échantillon représentatif du béton (ce qui est le cas lorsque le cône d'affaissement est réemployé).

3.9.5. Stabilité du réseau de bulles d'air

Afin d'évaluer l'évolution dans le temps et la qualité du réseau de bulles d'air d'un béton, il est possible d'effectuer le test du L-bar. Cet essai permet de déterminer la demi-distance entre deux bulles d'air, donc la distance maximale qui doit être parcourue par une goutte d'eau afin d'atteindre un pore capillaire. Pour chaque gâchée effectuée, un cylindre de 100 mm de diamètre par 200 mm de longueur est prélevé à 10 et 80 minutes. L'essai est effectué sur certains mélanges seulement par un technicien du laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke selon la norme ASTM C-457. Pour les bétons d'usine, l'essai est effectué sur les bétons de résistance nominale de 35 MPa avec air entraîné. Pour les bétons de laboratoire, l'essai est effectué sur les bétons de la série 2 suivants :

- | | |
|-----------------|--------------|
| ❖ 25 AE 0 réf.2 | ❖ 35 AE 50 B |
| ❖ 25 AE 50 B | ❖ 35 AE 50 C |
| ❖ 25 AE 50 C | ❖ 35 AE 50 D |
| ❖ 35 AE 0 | ❖ 35 AE 50 E |

Deux types d'instrumentation existent. Tout d'abord, un outil manuel est à la disposition des techniciens, mais avant de pouvoir l'utiliser une préparation concernant l'échantillon est nécessaire. Dans les cylindres réalisés lors de la gâchée de béton, des échantillons vont être façonnés pour obtenir des plaquettes de 10 x 10 cm et de 2 cm d'épaisseur. Ces plaquettes sont par la suite polies à l'aide de quatre poudres abrasives différentes ayant des grains de plus en plus fins. Sur les surfaces préparées, des lignes sont repérées afin de réaliser un balayage par points le long de ces dernières. Ainsi, à l'aide d'un microscope, le technicien vise un point et détermine s'il tombe sur de la pâte ou sur une bulle d'air. Cette lecture est réitérée jusqu'à avoir passé en revue toutes les lignes de l'échantillon. À noter que les points sont tous distants de 750 μm . Au final, le technicien dispose du nombre de points total, dont ceux qui seront identifiés comme pâte ou comme vide, et du nombre de bulles d'air interceptées. Il est alors possible d'en déduire le nombre de points correspondants à la rencontre de granulats. L'analyse terminée, des calculs sont alors à exécuter dans le but de déterminer les paramètres

les plus utiles dans la caractérisation du réseau de bulles d'air à savoir ; la teneur en air, la surface spécifique et le facteur d'espacement.

3.9.6. Temps de prise initial

La norme américaine ASTM C 403 est utilisée pour cet essai. Après 50 minutes de malaxage, le béton est placé sur un tamis surplombant un contenant. Muni de gants, il convient de gratter le matériau sur le tamis dans le but de pouvoir récolter la pâte. Cette dernière est par la suite placée dans deux cylindres huilés et tassés au moyen de coups de maillet en périphérie. Ils sont ensuite placés en étuve et recouverts afin d'éviter toute évaporation.

Des mesures sont prises à intervalles réguliers sur le mortier tamisé à partir du mélange de béton. Des aiguilles de diamètre de plus en plus petit, de valeur normalisée variant entre 1 et 1/10 de pouce, sont introduites dans la pâte au cours du temps afin de lire une valeur comprise entre 60 et 120 psi.

De cette manière, une droite peut être tracée au moyen des résultats et le temps de prise, obtenu graphiquement en abscisse, équivaut à une valeur de 500 psi sur l'axe des ordonnées. Une fiche type de mesure du temps de prise initial est jointe en annexe B. À noter que la température, le rapport E/L et les adjuvants ont une influence marquée sur le temps de prise.

3.9.7. Résistance à la compression

Pour cette étude, des essais de résistance du béton durci sont réalisés sur des échantillons moulés et durcis conformément à la norme CSA A23.2-3C. Un tableau, présenté en annexe C, présente un exemple de mesure de la résistance à la compression pour un béton type. Les échantillons doivent avoir un diamètre au moins égal à trois fois la dimension maximale du plus gros granulats contenu dans le béton et une longueur voisine de deux fois le diamètre. Des éprouvettes de 100 mm x 200 mm sont utilisées. Les éprouvettes sont remplies en trois couches pilonnées chacun de 20 coups et tapées en périphérie à l'aide d'un maillet sur chaque

niveau. Une arase est par la suite réalisée avec une truelle de bois et un entreposage de 24 heures sous bâche de plastique est nécessaire pour éviter toute évaporation.

Le démoulage se fait un jour après la confection du béton. Seules trois éprouvettes seront épargnées de la mise en étuve humide, car elles seront utilisées pour la réalisation des essais de compression à un jour. Une presse hydraulique permet la réalisation de l'essai. Des essais à 7 et 28 jours sont réalisés identiquement à l'essai à un jour. Il convient de mettre en valeur que la résistance à la compression est jugée adéquate lorsque les conditions suivantes relatives à la norme CSA A23.1 sont satisfaites. La moyenne des trois essais consécutifs à 28 jours est égale ou supérieure à la résistance spécifiée (f'_c) à 28 jours, et aucune résistance individuelle n'est inférieure à 3,5 MPa de la résistance spécifiée.

3.9.8. Résistance aux cycles rapides de gel - dégel

Les bétons de la série 35 MPa avec air entraîné doivent répondre à certains critères de durabilité. L'essai de résistance aux cycles de gel - dégel doit être fait conformément à la norme ASTM C 666 procédure A (Resistance of concrete to rapid freezing and thawing).

Après 50 minutes (débutant au contact eau-ciment), deux poutres de béton sont prélevées, dont les dimensions sont 320 mm longueur par 75 mm de hauteur et 75 mm de largeur. Quatre plots sont installés, deux sur chaque face, centrés et distants de 250 mm. Cette longueur sert de référence pour la mesure de la variation de longueur.

Les échantillons sont submergés dans l'eau à température contrôlée durant sept jours. Ils sont par la suite immergés dans un second bassin d'eau où la température est stable à $(4,4 \pm 1,7) ^\circ\text{C}$ durant une heure. Cela permet d'avoir une température de référence pour débiter l'essai. Ils sont alors transférés dans un cabinet de gel-dégel, boîte fermée où la température est contrôlée. Lors du gel, la température atteint $(-17,8 \pm 1,7) ^\circ\text{C}$ et remonte à $(4,4 \pm 1,7) ^\circ\text{C}$ lors du dégel. Il se produit six cycles complets de gel - dégel par jour, c'est-à-dire que l'échantillon sera gelé six fois et dégelé six fois durant 24 heures. Dans le cabinet de gel - dégel, les échantillons sont changés de place régulièrement afin d'assurer l'uniformité des résultats, la

température pouvant varier légèrement d'une extrémité à l'autre. L'essai se termine après 300 cycles, ou pour les bétons résistants moins bien, lorsque le module d'élasticité dynamique atteint 60 % du module d'élasticité initial.

La première mesure a lieu six jours après avoir placé l'échantillon dans un cabinet de gel - dégel. Par la suite les mesures ont lieu chaque trois jours. À chaque échéance, il faut mesurer la différence de longueur des éprouvettes sur deux faces opposées (X-X et Y-Y), la variation de masse et la vitesse de propagation d'ondes ultrasonores longitudinales pour chaque éprouvette (PUndit).

Tous ces paramètres sont analysés, et pour être conforme, le module d'élasticité dynamique final doit être au moins supérieur à 60 % du module initial.

3.9.9. Résistance à l'écaillage

Aussi effectué sur les bétons de la série 35 MPa avec air entraîné, l'essai de résistance à l'écaillage a été réalisé conformément à la procédure d'essai NQ 2621-900.

À 50 minutes, deux plaques sont prélevées, dont les dimensions sont 250 mm par 275 mm par 75 mm de profondeur. Une membrane géotextile est installée dans le fond du moule. Après 14 jours en chambre humide, les plaques demeurent dans une chambre à température ambiante contrôlée et à 50 % d'humidité relative durant un autre 14 jours. Elles sont ensuite recouvertes d'une solution saline de chlorure de sodium concentrée à $(3 \pm 1) \%$, et ce durant sept jours. Par la suite, les plaques d'écaillage sont transférées dans un réfrigérateur où il se produit un cycle de gel - dégel par jour. La température varie entre $(-18 \pm 3) ^\circ\text{C}$ et $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$. Les débris sont recueillis dans un tamis et lavés, puis seront séchés dans un four à $60 ^\circ\text{C}$ afin d'obtenir la masse sèche des résidus recueillis sur le dessus des plaques. Les débris sont recueillis à 0, 7, 21, 35, 46, et 57 jours. La masse de débris recueillis permet de noter la dégradation en g / m^2 . Selon la norme, la limite acceptable est de $500 \text{ g} / \text{m}^2$ après 57 jours.

3.9.10. Rapport E/L – essai au micro-onde

L'essai au micro-onde est effectué en usine seulement, où il est plus difficile de connaître les quantités précises des composants du béton. Cet essai est conforme à la norme AASHTO TP 23-2027. Il faut d'abord déposer 1 500 g de béton frais dans un plat supportant le micro-onde et préalablement recouvert d'une membrane de fibre de verre. Cette membrane, qui ne retient pas la chaleur et n'absorbe pas l'eau, permet d'éviter que le béton abîme le plat. La membrane doit également recouvrir le béton sur le dessus. Une première cuisson de 5 minutes permet à la majeure partie de l'eau de s'évaporer. Le béton est alors pilonné à l'aide d'un pilon de porcelaine à bout rond, qui n'absorbe pas l'eau et qui ne détruit pas les granulats. Une seconde cuisson de 5 minutes est nécessaire. Le béton est par la suite pesé, pilonné une seconde fois et chauffé pour une période de 2 minutes. Après ce délai, le béton est pesé à nouveau. Si la différence de masse entre les deux pesées de béton sec est inférieure à 1 gramme, l'essai est terminé. Si ce n'est pas le cas, il faut pilonner le béton et le remettre à chauffer durant deux autres minutes, et répéter la procédure jusqu'à l'obtention d'une masse finale quasi constante. Le rapport E/L est obtenu après certains calculs, dont un exemple est présenté en annexe D pour un béton de 30 MPa sans air entraîné.

4. CARACTÉRISATION DE L'EAU RECYCLÉE TRAITÉE

4.1. Eau recyclée utilisée en laboratoire

Un test simple permet de connaître la concentration de l'eau entreposée dans chacun des barils en laboratoire. Il suffit de prélever deux échantillons de 500 ml chacun, puis de laisser toute l'eau s'évaporer dans un four à 105 °C. Une fois le solide recueilli, il est possible de déduire la concentration de l'eau en parties par millions et divisant la quantité de solides (mg) par le volume d'eau initial (l). La quantité d'eau potable est dosée en fonction de la concentration de l'eau recyclée et les proportions sont calculées afin d'obtenir l'eau de gâchage à la concentration désirée. Un exemple, joint en annexe E, détaille le calcul de la concentration en ppm ainsi que les proportions d'eau de l'aqueduc et d'eau recyclée à ajouter à chacun un mélange type.

Tout au long des périodes d'essais, d'une durée d'environ quatre mois, la concentration de l'eau recyclée dans les barils tend à augmenter. Cela s'explique, en partie, par le fait que la prise d'eau dans les barils se fait à l'aide d'une chaudière directement à même les barils. Pour ce faire, les agitateurs sont temporairement arrêtés. Les matières solides en suspension dans l'eau décantent alors très rapidement, si bien qu'il est possible que l'eau perde temporairement de son homogénéité et que l'eau retirée contienne légèrement moins de particules solides que prévu. Une autre explication serait que les agitateurs, quoique très puissants, n'arrivent pas à conserver toutes les particules en suspension lorsque le baril est plein. Dans ce cas, il pourrait y avoir une accumulation de particules au fond du baril. À mesure que le baril est vidé, l'efficacité des agitateurs augmente, ce qui pourrait remettre en suspension une partie des solides décantés. Une autre source d'explication est l'évaporation de l'eau, mais pas des solides, ce qui a pour effet d'augmenter la concentration. Cette hypothèse est cependant moins plausible considérant que les barils sont fermés avec des couvercles en tout temps. Quoiqu'il arrive, l'augmentation des solides en suspension dans le temps n'a que peu d'effets sur le programme expérimental car la concentration (ppm) est mesurée avant chaque prélèvement d'eau dans le baril.

L'eau recyclée utilisée contient des particules solides qui influencent sa densité. La figure 4.1 présente la relation entre la densité et la concentration en solides en suspension (ppm) dans l'eau recyclée. La densité a été calculée en laboratoire à partir d'échantillons à différentes concentrations. Pour obtenir la densité, il s'agit de mesurer la masse de 500 ml d'eau recyclée à l'aide d'un ballon de verre spécialement conçu à cet effet.

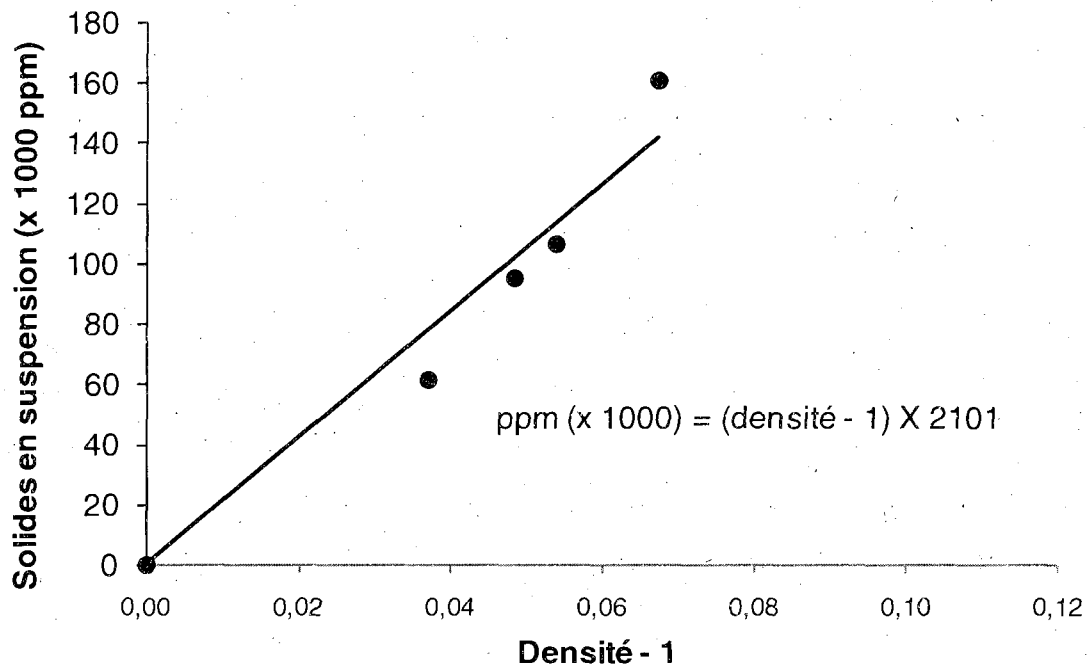


Figure 4.1 Densité de l'eau recyclée en fonction des solides en suspension (laboratoire)

Les résultats de la figure 4.1 montrent qu'une eau à 50 000 ppm possède une densité d'environ 1,03. Les mélanges effectués n'ayant jamais une concentration supérieure à 75 000 ppm, l'augmentation de la densité est considérée négligeable tout au long des calculs de masse volumique des mélanges de béton. Ainsi, même si un litre d'eau recyclée à 50 000 ppm a une densité d'environ 1,03, la valeur de 1,00 a été utilisée pour les ajustements volumiques.

4.2. Eau recyclée utilisée en usine

La même courbe, présentant la densité pour l'eau utilisée en usine, est présentée à la figure 4.2. La densité est calculée de la même manière qu'en laboratoire, c'est-à-dire en trouvant la

masse d'un volume connu d'eau recyclée. Un ballon de 1,066 L est utilisé comme volume de référence. La concentration est obtenue en faisant évaporer l'eau sur un élément chauffant électrique. Après évaporation, il ne reste que les solides et il est possible de faire le rapport en gramme de la masse de solide sur la masse d'eau initiale (incluant les solides).

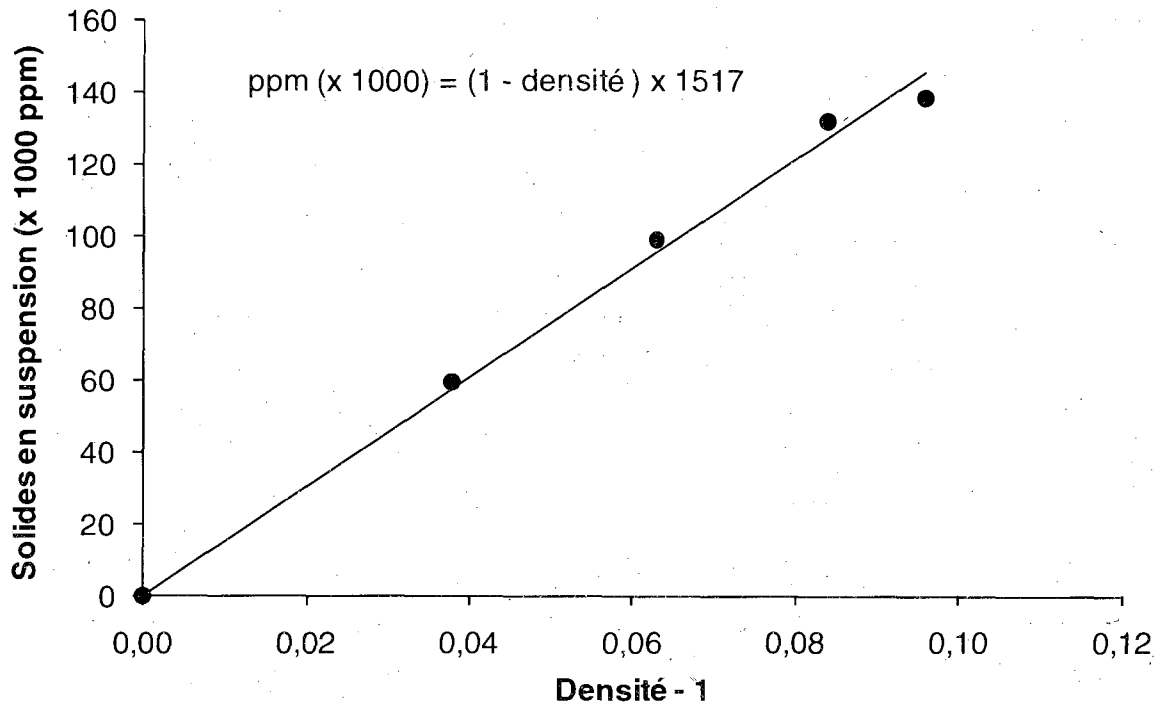


Figure 4.2 Densité de l'eau recyclée en fonction des solides en suspension (usine)

4.3. Décantation de l'eau recyclée

Une différence a rapidement été observée entre l'eau recyclée utilisée en laboratoire (lors de la série 2) et celle utilisée en usine (lors de la série 3). Visuellement, les deux échantillons d'eau ne présentent pas la même apparence ni la même texture et ce même à des concentrations identiques. Pour tenter de comprendre l'origine de cette différence, des essais de décantation ont été effectués à partir d'un échantillon prélevé en laboratoire et d'un échantillon prélevé en usine. Suite à ces observations, il a été ajouté au plan de travail initial de regarder l'évolution des décantations des deux eaux. Pour ce faire, 500 ml d'un échantillon d'eau utilisée lors de la série 2 et 500 ml d'eau utilisée lors de la série 3 sont mesurée dans un cylindre gradué. Par la

suite, le temps de décantation est noté, de même que la hauteur de la colonne des solides dans les cylindres. Des photos ont été prises pour mieux comprendre les différences de comportement en décantation. Il faut noter que l'échantillon de laboratoire a une concentration de 163 500 ppm (212 ml de solides / 500 ml d'eau) alors que l'eau d'usine a une concentration, juste avant la décantation, de 96 500 ppm (82 ml de solides / 500 ml d'eau). La décantation n'a donc pas pour objectif de calculer la quantité de solides par échantillon, mais bien de constater la différence de vitesse de décantation.

Tableau 4.1 Valeurs comparatives des temps de décantation de l'eau recyclée

| Date | Heure | Temps | Volume de la colonne de liquide contenant les solides en suspension (ml) | |
|------------|---------|--------|--|---------------------------------|
| | | | Eau utilisée en laboratoire (série 2) | Eau utilisée en usine (série 3) |
| 2008-05-28 | 13 h 15 | 0 min | 250 | 250 |
| 2008-05-28 | 13 h 20 | 5 min | 250 | 205 |
| 2008-05-28 | 13 h 25 | 10 min | 250 | 178 |
| 2008-05-28 | 13 h 30 | 15 min | 250 | 130 |
| 2008-05-28 | 13 h 35 | 20 min | 250 | 112 |
| 2008-05-28 | 13 h 40 | 25 min | 250 | 108 |
| 2008-05-28 | 13 h 45 | 30 min | 250 | 104 |
| 2008-05-28 | 14 h 00 | 45 min | 250 | 96 |
| 2008-05-28 | 14 h 15 | 1 h | 250 | 90 |
| 2008-05-28 | 15 h 15 | 2 h | 250 | 82 |
| 2008-05-28 | 16 h 15 | 3 h | 248 | 82 |
| 2008-05-28 | 17 h 15 | 4 h | 248 | 82 |
| 2008-05-28 | 19 h 15 | 6 h | 246 | 82 |
| 2008-05-29 | 13 h 15 | 19 h | 235 | 82 |
| 2008-05-29 | 13 h 15 | 24 h | 232 | 82 |
| 2008-05-30 | 13 h 15 | 48 h | 219 | 82 |
| 2008-06-02 | 13 h 15 | 120 h | 212 | 82 |

Les photos 4.3 à 4.7 permettent de visualiser le processus de décantation des deux échantillons d'eau. La figure 4.3 présente le temps initial (0 minute). Le cylindre de droite présente l'eau recyclée de la série 2 (laboratoire) et celui de gauche l'eau recyclée de la série 3 (usine).

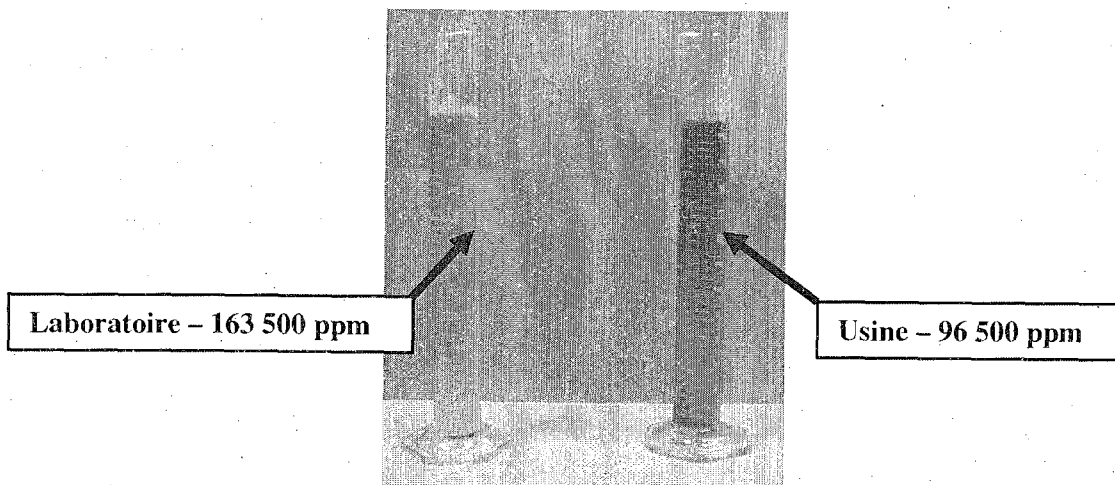


Figure 4.3 Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 0 minute

Après cinq minutes, l'eau recyclée fraîchement prélevée en usine a décantée rapidement, alors que l'eau de laboratoire présente toujours un état homogène. Le volume de la colonne de solides en suspension est à 205 ml (figure 4.4) sur l'échantillon d'eau d'usine. Ces résultats suggèrent que l'échantillon d'eau fraîchement prélevé en usine contient des particules plus grossières que l'échantillon conservé pendant une longue période en laboratoire.

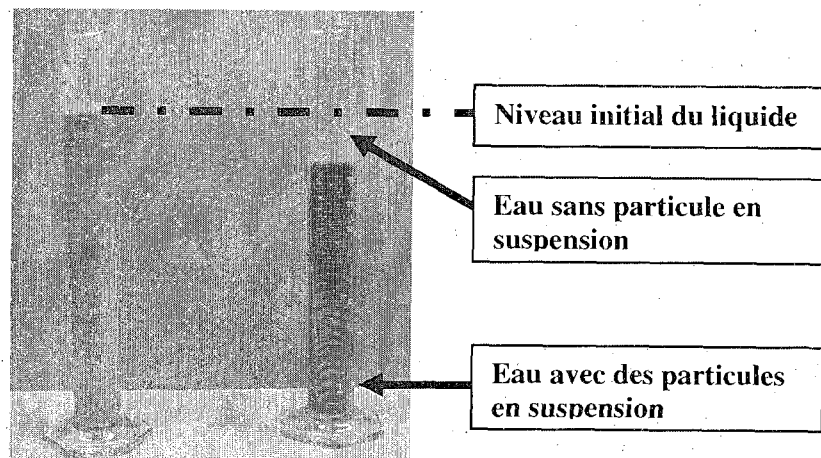


Figure 4.4 Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 5 minutes

Deux heures après le début de la décantation, l'échantillon d'usine s'est stabilisé à un volume de solides en suspension de 82 ml (figure 4.5). L'échantillon de laboratoire n'a toujours pas commencé à décanter. Ces résultats tendent à montrer que l'eau recyclée conservée en

laboratoire est constituée de particules nettement plus fines que celles contenues dans l'eau d'usine.

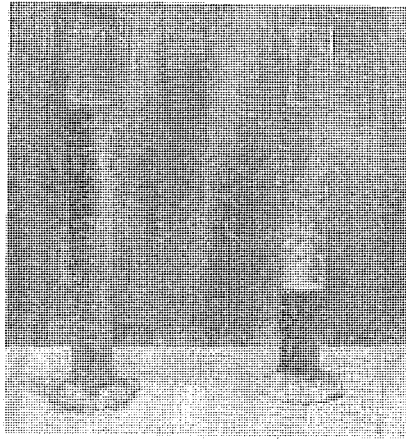


Figure 4.5 Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 2 heures

Après 24 heures de décantation, l'échantillon d'usine s'est stabilisé à un volume de solides en suspension de 82 ml, et l'échantillon de laboratoire présente maintenant un volume de solides en suspension de 232 ml (figure 4.6). La décantation, qui avait débuté après 3 heures (voir tableau 4.1) est donc bien amorcée. Visuellement, l'échantillon de laboratoire semble beaucoup plus dense et visqueux.

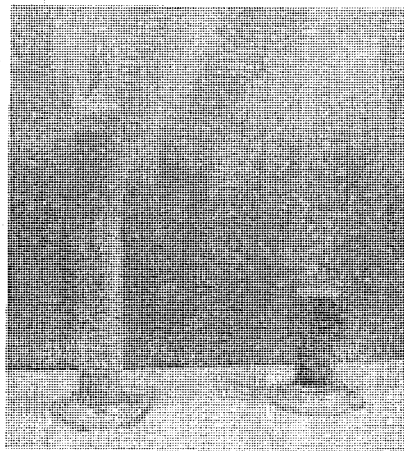


Figure 4.6 Décantation des particules solides dans l'eau recyclée, temps 24 heures

Après 120 heures de décantation, l'eau recyclée de laboratoire a atteint un état de décantation stable correspondant à un volume de solides en suspension de 212 ml (figure 4.7). Cette série de mesures démontre que les deux eaux recyclées possèdent des caractéristiques différentes.

L'observation visuelle des particules sédimentées dans l'eau d'usine démontrent des particules plutôt grossières et sableuses alors que celles dans l'eau de laboratoire sont beaucoup plus fines.

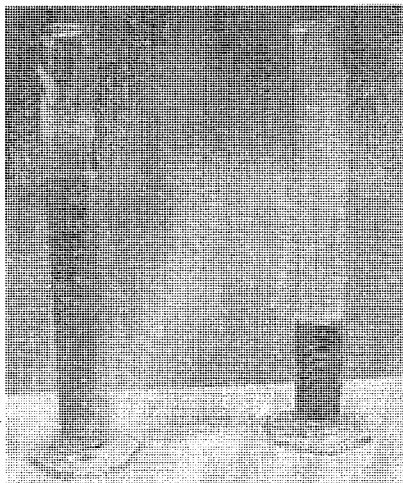


Figure 4.7 Décantation des particules solides dans l'eau recyclé, temps 120 heures

Tel que mentionné au chapitre 3, l'eau utilisée en laboratoire est demeurée quatre mois dans des barils de 200 litres sous agitation constante et très violente. Il est probable que le processus mécanique ait érodé les particules des solides en suspension. De plus, les particules cimentaires après quatre mois sont certainement toutes hydratées et carbonatées, ce qui n'est peut-être pas le cas pour une eau jeune de quelques jours comme celle utilisée en usine. Ces différences majeures ont mené vers d'autres caractérisations, notamment un lavage au tamis 80 μm et une granulométrie laser.

4.4. Lavage au tamis 80 μm

Pour tenter de mieux comprendre les différences entre les deux eaux recyclées (laboratoire et usine), il a été décidé d'effectuer un lavage au tamis 80 μm afin de déterminer la proportion de particules très fines contenues dans chacune des eaux recyclées.

Pour chaque échantillon d'eau, 950 ml ont été prélevés à l'aide d'un cylindre gradué. Quatre contenants métalliques sont nettoyés, identifiés et pesés, deux plus petits pour recueillir les solides retenus sur le tamis 80 μm et deux plus grands pour recueillir le passant du même

tamis. L'échantillon d'eau est versé sur le tamis 80 μm . Pour s'assurer que tous les grains suffisamment fins traversent le tamis, un arrosage du tamis avec un jet à faible pression est nécessaire. Les résidus solides, demeurés sur le tamis, sont alors transvidés dans un contenant plus petit, et le tamis est à nouveau nettoyé avec un jet d'eau afin de s'assurer qu'aucune particule ne demeure coincée. Les contenants remplis d'eau et de solides sont placés dans des étuves à 105 ° C durant 48 heures afin de s'assurer que toute l'eau est évaporée. Ils sont ensuite pesés à nouveau pour déterminer la quantité de solides retenus et passant le tamis 80 μm (tableau 4.2).

Tableau 4.2 Résultats du lavage au tamis 80 μm , comparaison de deux eaux recyclée

| | Description | Masse des solides (g) | Pourcentage (%) |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Eau recyclée (laboratoire) | Retenu tamis 80 μm | 4,8 | 4,6 |
| | Passant tamis 80 μm | 99,8 | 95,4 |
| Eau recyclée (usine) | Retenu tamis 80 μm | 21,6 | 22,3 |
| | Passant tamis 80 μm | 75,3 | 77,7 |

Les résultats du tableau 4.2 montrent que les résidus solides de l'eau recyclée conservée en laboratoire sont beaucoup plus fins puisque 95 % des solides en suspension passent le tamis 80 μm comparativement à 78 % dans le cas de l'eau fraîchement prélevée en usine.

4.5. Granulométrie laser

Une granulométrie laser a été effectuée avec les solides passants le tamis 80 μm des deux échantillons d'eau. Tout d'abord, les solides recueillis lors du lavage du tamis sont broyés afin de séparer les particules qui peuvent s'être agglomérées. Ensuite, l'échantillon est soumis à des ultrasons afin de séparer toutes les particules. Le granulomètre laser projette un rayon laser sur l'échantillon de poudre en suspension dans l'eau. Ce rayon est diffracté différemment dépendamment de la grosseur de la particule qu'il intercepte. Plus la particule est grosse, plus l'angle de diffraction est faible. Chaque angle de diffraction est associé à une grosseur de particules. C'est ce principe qui permet de connaître la granulométrie d'une poudre fine. Le granulomètre laser utilisé est conçu pour détecter les particules dont le diamètre est compris entre 0,05 μm et 900 μm .

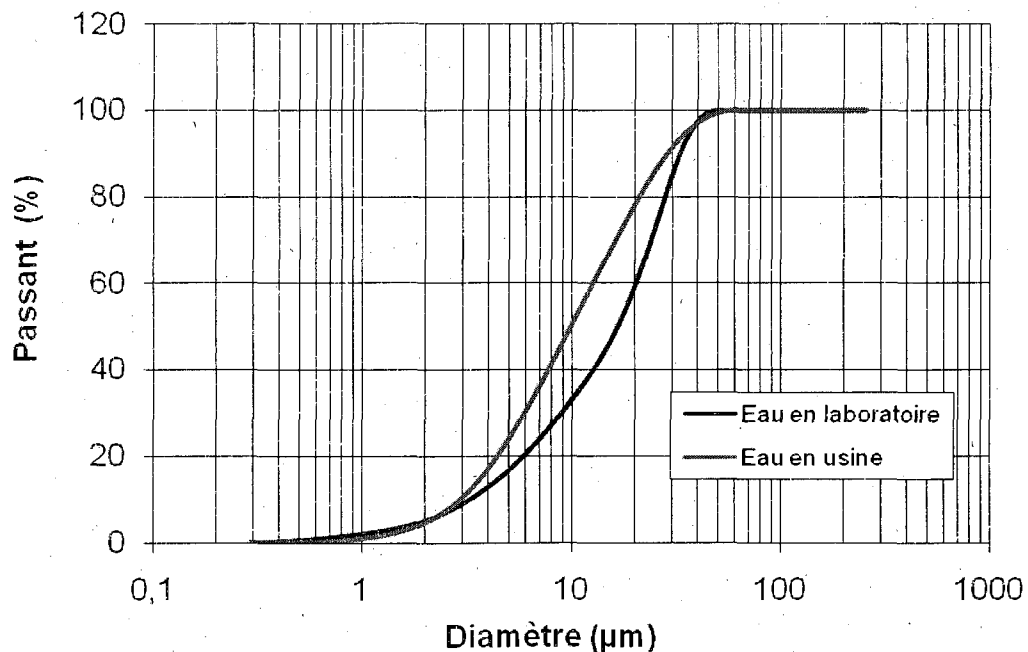


Figure 4.8 Courbe granulométrique des solides passant le tamis 80 μm

La figure 4.9 présente les courbes granulométriques (laser) de la fraction des solides en suspension qui passent le tamis 80 μm . Comme une plus grande partie des solides de l'eau de laboratoire ont passé le tamis 80 μm , il était attendu que la granulométrie de ces solides

indique une plus grande finesse. Or, l'analyse des courbes granulométriques montre que l'eau recyclée de laboratoire contient des particules plus grosses que celles de l'eau fraîchement prélevée en usine. C'est dans la place comprise entre 5 et 30 μm que la proportion de particules grossières est la plus importante.

4.6. Synthèse des caractéristiques de l'eau recyclée traitée

Les essais de décantation, lavage au tamis 80 μm et granulométrie laser ont permis de démontrer la différence majeure suivante : l'eau recyclée de laboratoire contient des particules plus fines que l'eau recyclée d'usine. En effet, c'est environ 95 % des particules de l'eau recyclée de laboratoire qui passent le tamis 80 μm alors que ce pourcentage chute à 77 % dans le cas de l'eau recyclée d'usine. Les mesures de décantation confirment que l'eau recyclée d'usine contient des particules plus grossières.

Tel que mentionné précédemment, l'eau utilisée au laboratoire de l'Université de Sherbrooke a été conservée dans des bassins pendant quatre mois. L'agitation prolongée et très violente de l'eau recyclée de laboratoire a probablement contribué à éroder les particules en suspension. C'est pour cette raison que l'eau recyclée de laboratoire n'est pas parfaitement représentative de l'eau recyclée d'usine. Il faudra tenir compte de ce facteur lors de l'analyse des résultats. Ce qui importe davantage, c'est de pouvoir déduire que les effets de l'eau recyclée en usine sont de beaucoup atténués comparativement aux effets de l'eau recyclée de laboratoire. Il s'agit ainsi d'un facteur de sécurité supplémentaire.

5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Cette section présente tous les résultats expérimentaux obtenus lors de la fabrication de bétons en laboratoire et en usine. La première section (section 5.1) présente les résultats des essais préliminaires, soit de la série 1. Comme ces résultats sont préliminaires et que les mélanges ont été refaits lors de la série 2, une brève analyse sera jointe à la présentation des résultats. Ces données ne seront pas analysées dans le chapitre 6.

À noter que dans tous les tableaux de résultats et lors de l'analyse, l'adjuvantation est exprimée en ml d'adjuvant par 100 kg de ciment.

5.1. Essais préliminaires (série 1)

Il faut noter que dans le cas des bétons de la série 1, il est difficile de tirer des conclusions très précises considérant que le rapport E/C est non constant. En effet, une erreur est survenue lors du calcul de la teneur en eau du sable entraînant ainsi une variation du rapport E/C. Par ailleurs, tous les mélanges effectués au cours de cette série d'essais ont été repris lors de la série 2, tout en conservant un E/C réel constant.

Le tableau 5.1 présente les résultats de laboratoire obtenus avec les bétons de 25 MPa sans air entraîné (série 1). Cette série comprend un béton de référence, sans eau recyclée, un béton avec une eau de gâchage à 50 000 ppm mais sans modification de l'adjuvantation et deux bétons avec une eau de gâchage à 50 000 ppm. Pour chaque béton, les mesures de température, d'affaissement et du volume d'air sont présentées à 10, 20, 50 et 80 minutes après le contact eau-ciment. Le tableau présente aussi le temps de prise et les résistances à la compression à 1, 7 et 28 jours. Tel que mentionné précédemment, le rapport E/C varie de 0,70 (béton référence) à 0,73 (bétons A et B). Cette variation peut influencer les propriétés des bétons en s'ajoutant à celle de l'eau recyclée.

Tableau 5.1 Résultats des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 1

| L-25SAE-1 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------|------|-------------------------|-------------------|----|----|----|-------------|-----|-----|-----|------------------|----|----|----|------------------------|-----------------------------------|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | | Temps (j) | | |
| | | | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | | 1 | 7 | 28 |
| Référence | 0,70 | WR = 250 | 55 | 45 | 38 | 28 | 2,1 | 2,4 | 2,5 | 2,3 | 22 | 21 | 22 | 21 | 3h30 | 14 | 26 | 30 |
| 50 000 ppm | 0,72 | WR = 250 | 22 | 17 | 17 | 12 | 2,7 | 2,6 | 2,5 | 1,7 | 23 | 23 | 23 | 23 | 3h35 | 16 | — | 36 |
| 50 000 ppm A | 0,72 | Dx = 250 727 = 100 | 44 | 42 | 40 | 27 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | — | — | 21 | 22 | 3h45 | 15 | 26 | 31 |
| 50 000 ppm B | 0,73 | Dx = 400 727 = 100 | 68 | 61 | 40 | 27 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 23 | 22 | 22 | 22 | 3h30 | 16 | 27 | 31 |

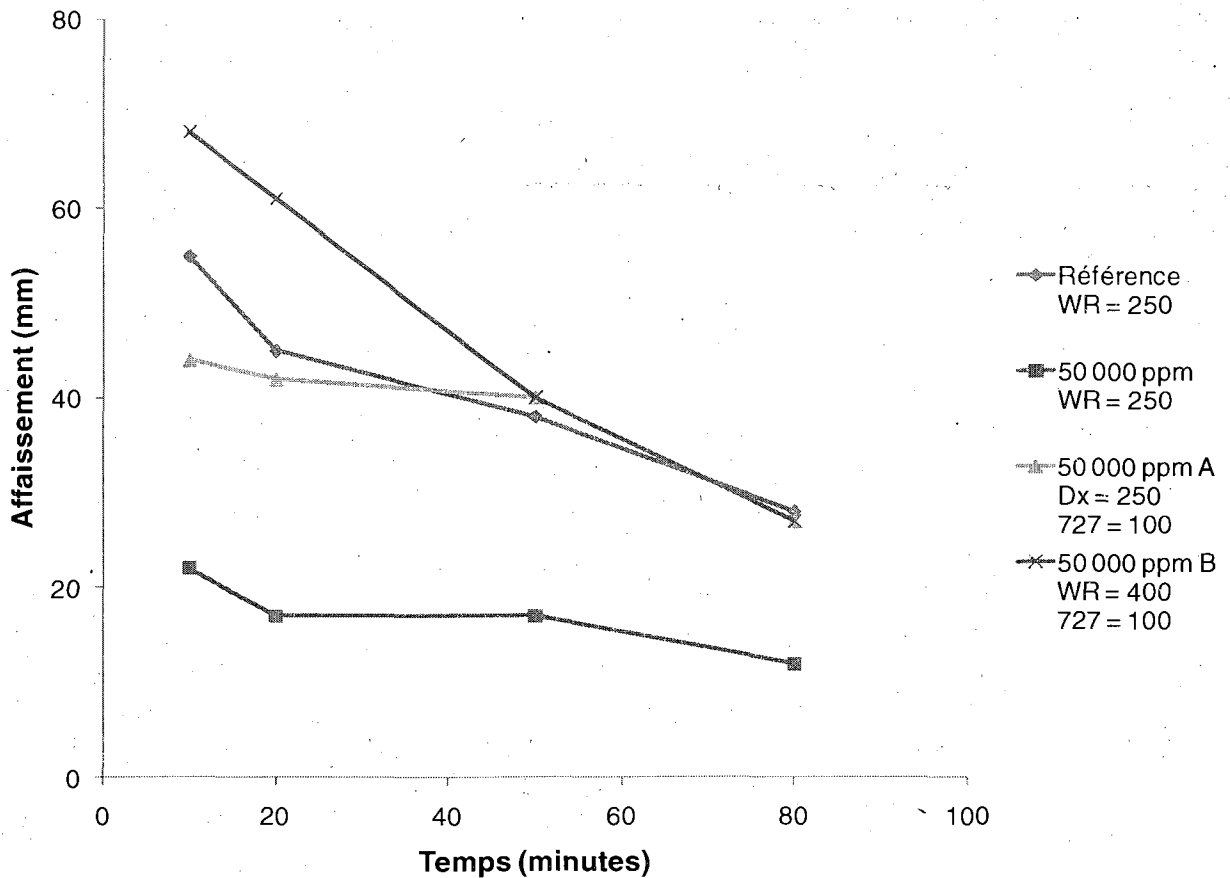


Figure 5.1 Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa sans air entraîné

La figure 5.1 montre la variation de l'affaissement du béton 25 MPa SAE dans le temps (0 à 80 minutes). L'affaissement initial du béton de référence chute d'environ 25 mm entre 10 et 80 minutes. L'affaissement du béton 50 000 ppm sans adjuvant est faible dès le début de la gâchée (10 minutes) ce qui explique qu'il soit plus stable dans le temps. L'affaissement plus faible au début est dû à l'effet des fines particules contenues dans l'eau recyclée. En modifiant l'adjuvantation, comme pour les mélanges 50 000 ppm A et B, la variation de l'affaissement est semblable à celle du béton de référence : l'affaissement à 10 minutes est élevé et chute dans le temps.

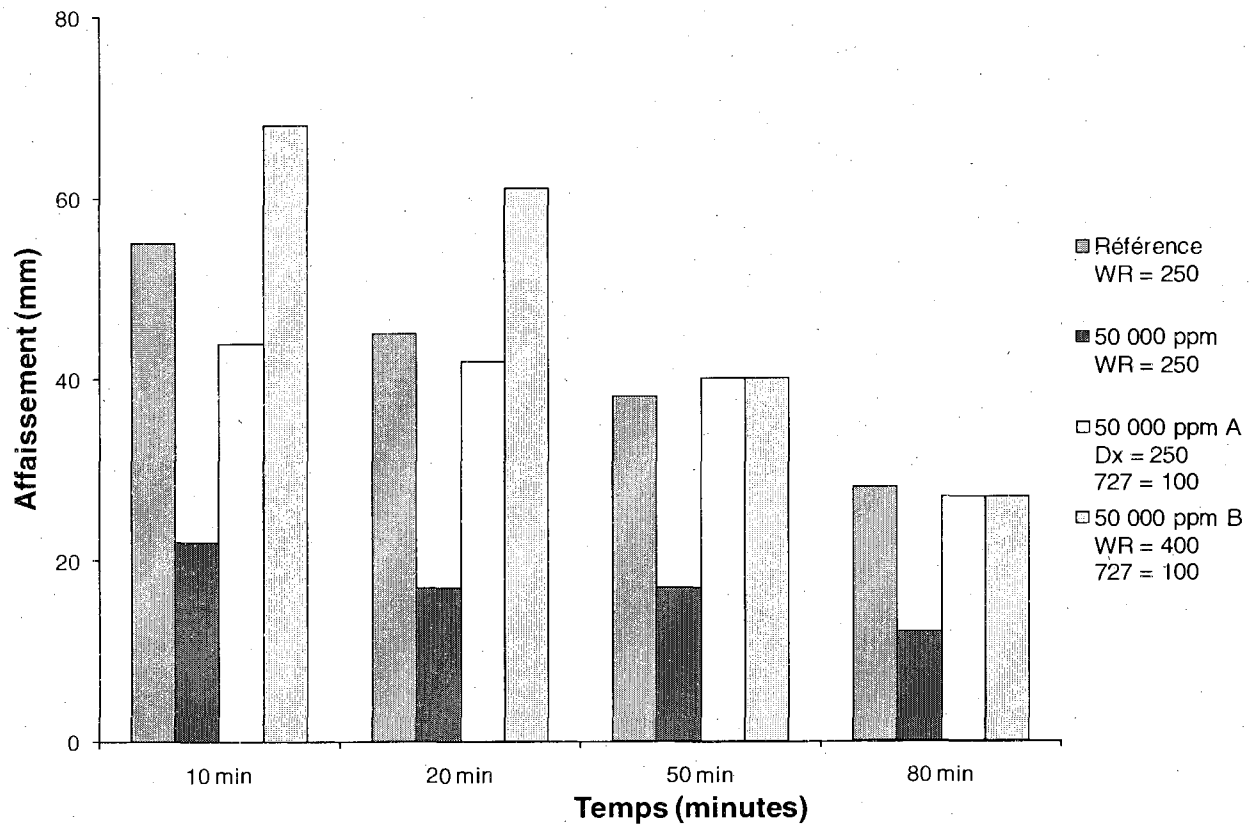


Figure 5.2 Affaissement – 25 MPa sans air entraîné

La figure 5.2 présente l'influence de l'eau recyclée sur l'affaissement du béton. La référence à 0 ppm présente cependant un affaissement un peu faible par rapport à l'objectif, soit un affaissement variant entre 80 mm et 100 mm à 10 minutes. Par la suite, il est flagrant que la référence à 50 000 ppm, dont l'adjuvantation n'a pas été ajustée, présente une perte

d'affaissement importante. Les deux mélanges adjuvantés conséquemment à l'utilisation de l'eau recyclée permettent de rétablir l'affaissement à des valeurs voisines, voire supérieures, au béton de référence (0 ppm).

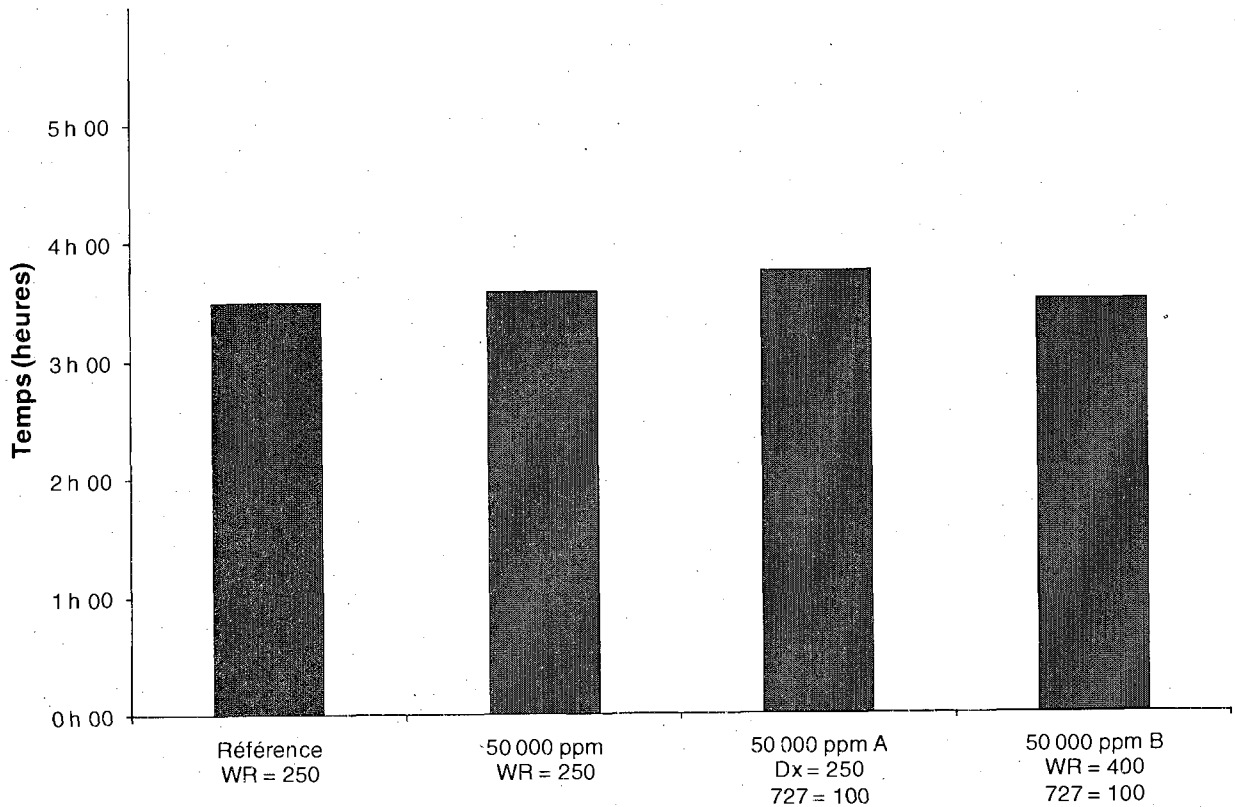


Figure 5.3 Temps de prise initial – 25 MPa sans air entraîné

Le temps de prise le plus court (0 ppm) est de 3 h 30 minutes, comparativement à celui le plus long (50 000 ppm A) qui est de 3 h 45 minutes. Étant donné une variation de seulement 15 minutes, il semble que l'eau recyclée n'ait aucunement influencé le temps de prise des bétons 25 MPa sans air entraîné (figure 5.3).

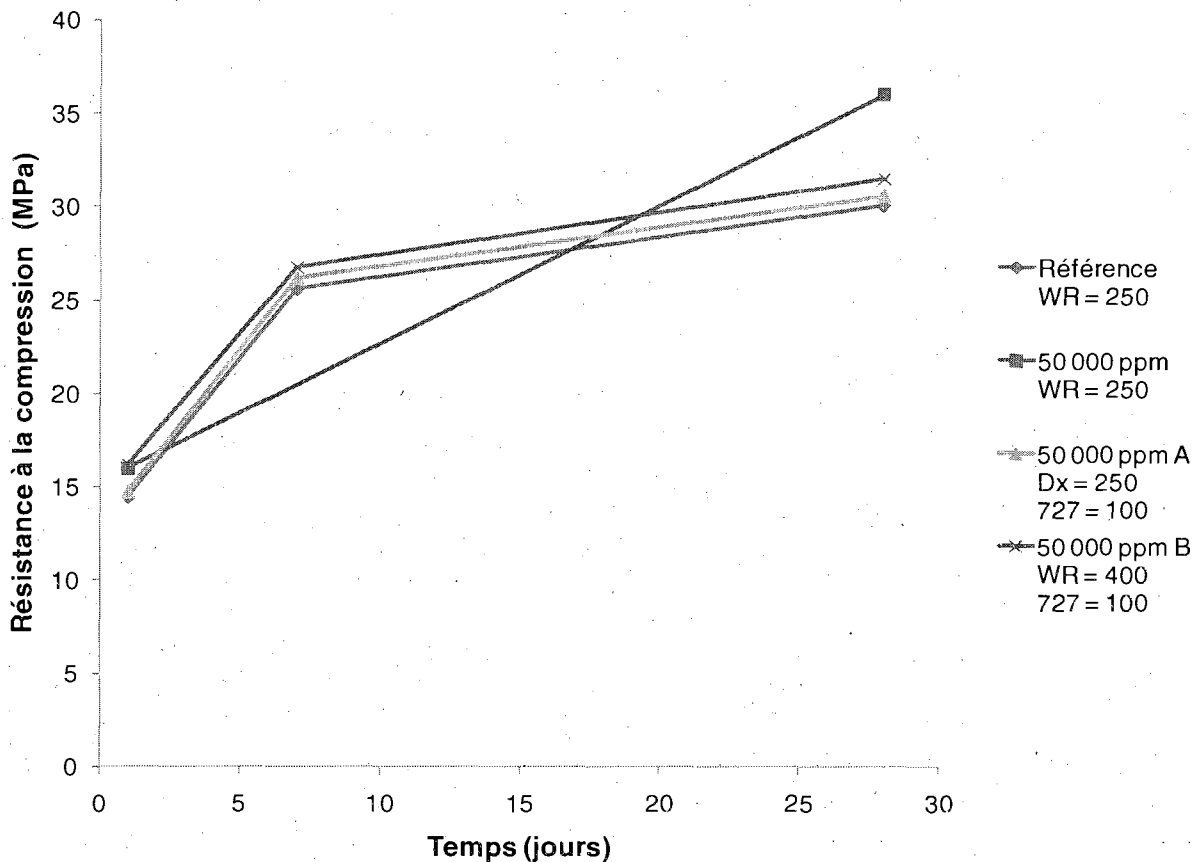


Figure 5.4 Résistance à la compression – 25 MPa sans air entraîné

La figure 5.4 présente l'évolution de la résistance à la compression à un, sept et 28 jours, pour différents mélanges à 50 000 ppm et une référence à 0 ppm. Tout d'abord, les résistances à 28 jours sont amplement supérieures à 25 MPa. La référence à 50 000 ppm dont l'adjuvantation est la même que la référence à 0 ppm atteint 36 MPa à 28 jours, valeur particulièrement élevée pour un mélange à 25 MPa de résistance nominale. En comparant avec la référence sans eau recyclée, il semble que l'ajout d'eau recyclée augmente légèrement la résistance à la compression et ce autant à jeune âge qu'à 28 jours. À noter qu'une erreur est survenue dans les manipulations et que la référence à 50 000 ppm n'a pu être testée à sept jours.

Le tableau 5.2 présente les résultats de laboratoire obtenus avec les bétons de 25 MPa avec air entraîné (série 1). Comme dans le cas précédent, le rapport E/C varie de 0,64 (béton référence) à 0,69. Il est donc difficile d'analyser les résultats de cette série puisque la variation du E/C peut, comme l'eau recyclée, influencer les propriétés des bétons.

Cette série de béton comporte un béton de référence sans eau recyclée. Les bétons avec eau recyclée ont été fabriqués avec des eaux de gâchage à 50 000 ppm et 75 000 ppm. Pour chaque teneur en solides, l'adjuvantation a été modifiée pour tenter d'atteindre les caractéristiques souhaitées au niveau des propriétés des bétons frais.

Tableau 5.2 Résultats des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 1

| L-25AE-1 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------|------|-----------------------------------|-------------------|----|----|----|-------------|-----|-----|-----|------------------|----|----|----|------------------------|--------------------------------------|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | | Temps (j) | | |
| | | | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | | 1 | 7 | 28 |
| Référence | 0,64 | Air = 20 WR = 250 | 94 | 56 | 47 | 38 | 5,2 | 4,4 | 3,9 | 3,4 | 21 | 21 | 21 | 21 | 3h50 | 14 | 25 | 31 |
| 50 000 ppm | 0,67 | Air = 20 WR = 250 | 47 | 35 | 25 | 19 | 3,7 | 3,5 | 3,4 | 3,3 | 24 | 24 | 23 | 23 | 3h00 | 15 | — | 34 |
| 75 000 ppm | 0,69 | Air = 20 WR = 250 | 23 | 22 | 15 | 7 | 3,7 | 3,6 | 3,5 | 3,2 | 22 | 21 | 19 | 19 | 4h10 | 16 | 27 | 34 |
| 50 000 ppm A | 0,64 | Air = 20 Dx = 250 727 = 100 | 35 | 31 | 20 | 15 | 2,5 | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 25 | 25 | 26 | 27 | 3h40 | 18 | 28 | 34 |
| 50 000 ppm B | 0,66 | Air = 30 Dx = 250 727 = 100 | 85 | 63 | 40 | 30 | 3,2 | 3,3 | 2,7 | 2,7 | 27 | 27 | 28 | 29 | 4h20 | 14 | 25 | 32 |
| 50 000 ppm C | 0,65 | Air = 40 Dx = 250 727 = 100 | 54 | 43 | 28 | 18 | 3,5 | 3,5 | 3,4 | 3 | 23 | 22 | 22 | 23 | 4h35 | 15 | 27 | 34 |
| 50 000 ppm D | 0,64 | Air = 60 Dx = 400 727 = 100 | 64 | 44 | 35 | 25 | 6,2 | 5,8 | 4,8 | 4,5 | 23 | 23 | 22 | 22 | 3h35 | 15 | 25 | 31 |
| 75 000 ppm A | 0,69 | Air = 60 Dx = 400 727 = 100 | 55 | 50 | 30 | 20 | 5,3 | 5,1 | 4,5 | 4,2 | 24 | 23 | 23 | 22 | 4h20 | 15 | 24 | 30 |

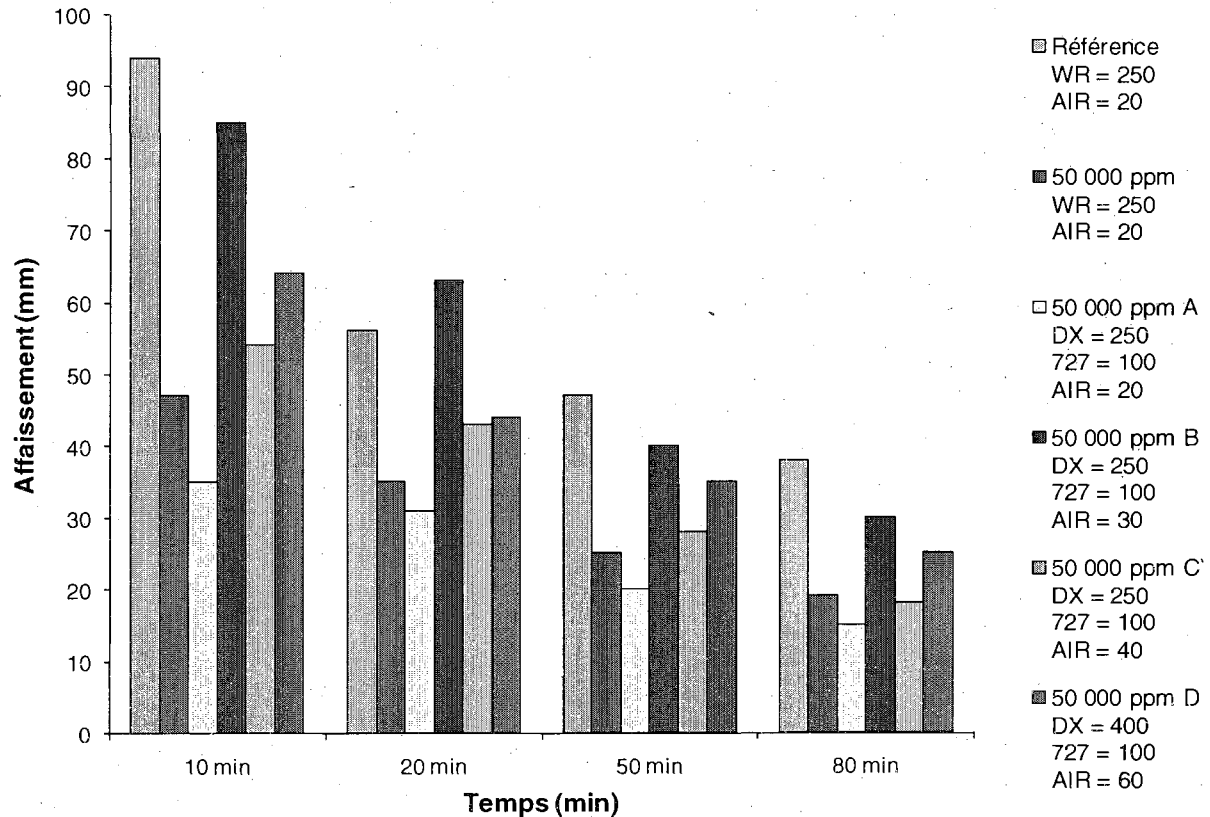


Figure 5.5 Affaissement – 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm

Les résultats de la figure 5.5 montrent que la référence à 0 ppm présente un affaissement initial de 95 mm, ce qui correspond à l'objectif visant 80 à 100 mm d'affaissement à 10 minutes. Une chute importante d'affaissement caractérise la référence à 50 000 ppm, et se maintient même pour le mélange adjuvanté A dans lequel une faible dose de 727 est ajoutée. Le mélange 50 000 ppm B présente l'affaissement désiré, et ce, bien que la dose d'Airextra soit que très légèrement augmentée. Les mélanges C et D présentent des affaissements un peu faibles, malgré une dose d'Eucon Dx importante dans le mélange D. Plusieurs facteurs affectent l'affaissement des bétons de laboratoire, notamment la qualité du malaxage, la température et la teneur en air.

Globalement, ces résultats montrent que l'ajout d'eau recyclée dans un béton cause une perte importante d'affaissement, qui semble cependant récupérable par l'ajout d'adjuvants (B). Malgré tout, les affaissements des bétons 25 MPa AE de la série 1 demeurent faibles.

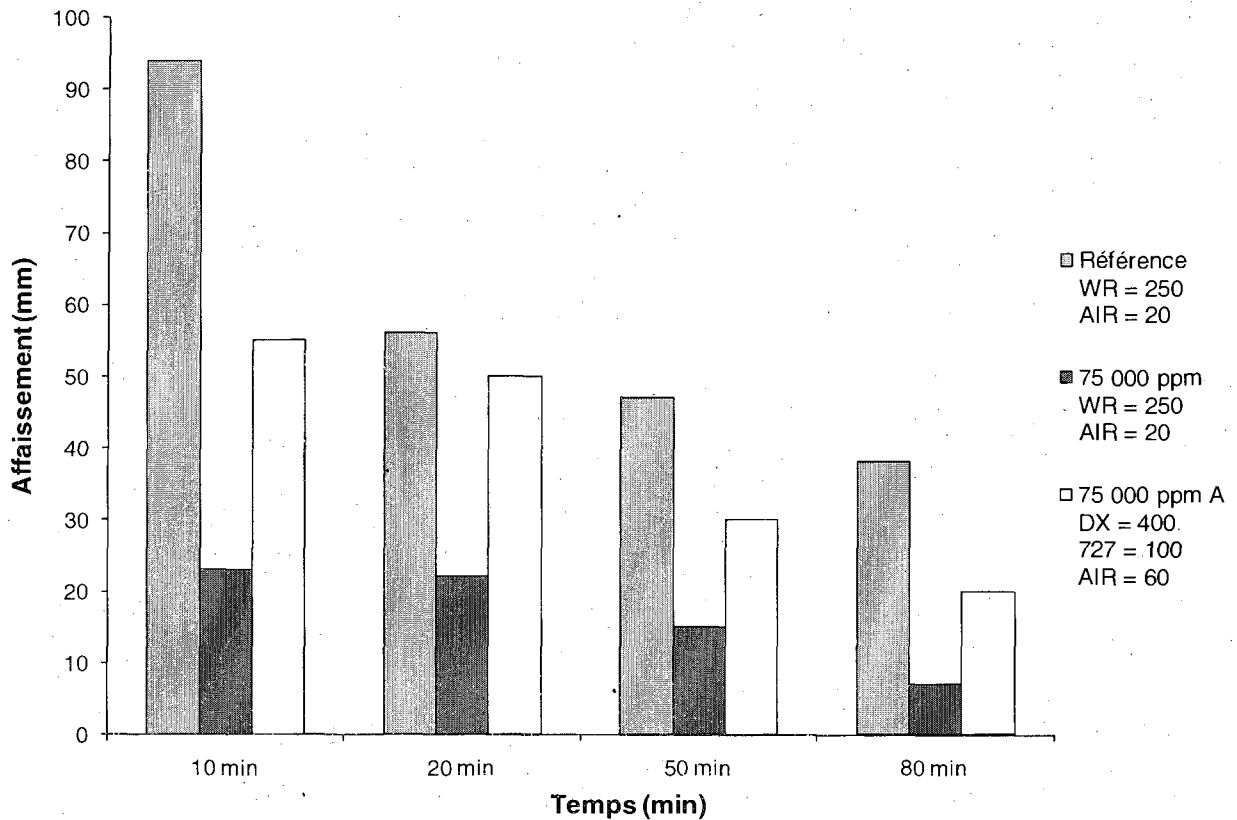


Figure 5.6 Affaissement -- 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm

La figure 5.6 présente l'influence de l'eau recyclée sur l'affaissement des bétons fabriqués avec une eau de gâchage à 75 000 ppm. L'utilisation d'eau de gâchage à 75 000 ppm sans modification de l'adjuvantation engendre une perte d'affaissement très importante (environ 70 mm). Malgré l'ajout d'une dose élevée d'Eucon Dx ainsi qu'une augmentation de l'Airextra, le mélange 75 000 ppm A présente un affaissement faible. Peu de mélanges adjuvantés à 75 000 ppm ont été réalisés pour cette série, mais il semble a priori qu'il est difficile de produire des bétons ayant l'affaissement désiré avec de l'eau à cette concentration.

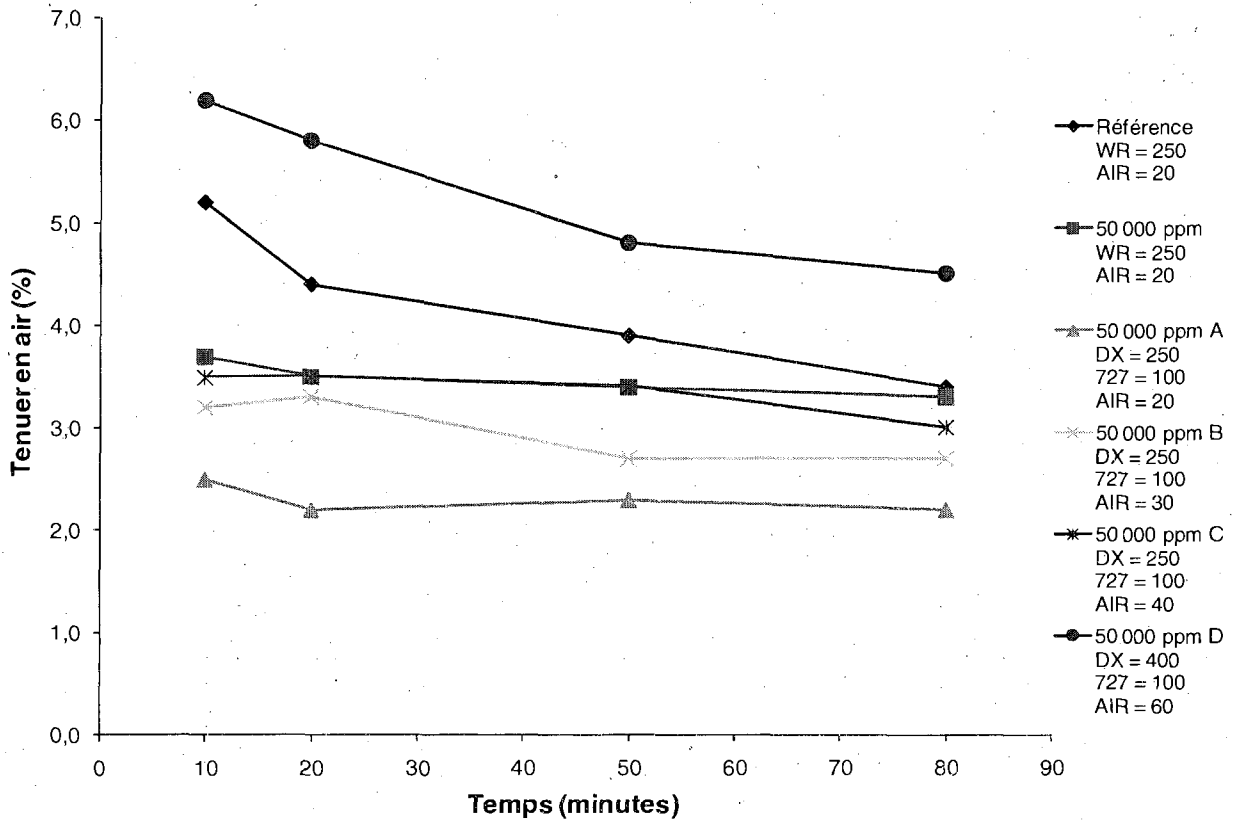


Figure 5.7 Teneur en air – 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm

La figure 5.7 présente l'influence de l'eau recyclée sur l'évolution de la teneur en air des bétons de 25 MPa avec air entraîné fabriqués avec une eau de gâchage à 50 000 ppm.

Les courbes de la figure 5.7 montrent que le volume d'air des mélanges de la série 25 MPa AE ne correspond pas toujours exactement à l'objectif fixé, soit entre 5 % et 7 % du volume total. Bien que la référence ait 5,2 % d'air à 10 minutes, une chute du volume d'air est observée dans le temps. La référence à 50 000 ppm, contenant la même adjuvantation que la référence à 0 ppm, présente une chute du volume d'air, surtout à 10 minutes.

Par la suite, les mélanges adjuvantés A, B et C ne rétablissent pas la situation, et ce, malgré l'augmentation constante de l'agent entraîneur d'air. Finalement, la quatrième variation de l'adjuvantation (D), où l'Airextra est triplée comparativement à la référence, obtient une teneur en air de 6,2 % ce qui est satisfaisant. À noter que pour ce mélange, la dose d'Eucon Dx a également été augmentée, ce qui peut possiblement influencer la teneur en air.

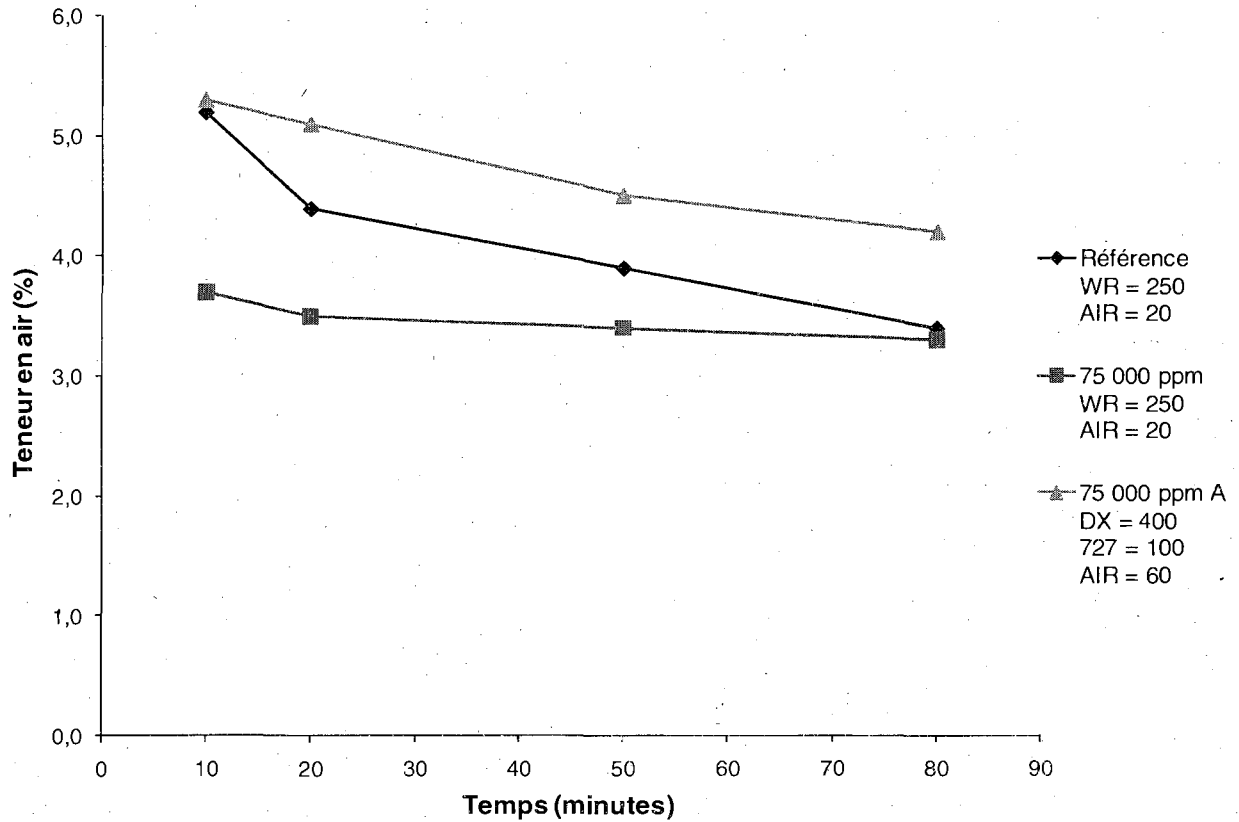


Figure 5.8 Teneur en air – 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm

La figure 5.8 présente l'influence de l'eau recyclée sur l'évolution de la teneur en air des bétons de 25 MPa avec air entraîné fabriqués avec une eau de gâchage à 75 000 ppm. La référence sans eau recyclée présente un volume d'air initial supérieur à la référence à 75 000 ppm (figure 5.8). Le volume d'air est identique après 80 minutes, ce qui est principalement attribuable au fait qu'un faible volume d'air se conserve mieux dans le temps. En triplant la dose de l'agent entraîneur d'air et en utilisant un réducteur d'eau de plus grande portée (l'Eucon Dx par rapport au Eucon WR), il semble possible de rétablir la teneur en air d'un mélange, même contenant de l'eau à 75 000 ppm (figure 5.8). Par contre, tous les volumes d'air demeurent un peu faibles, ce qui pourrait compromettre la durabilité de ces bétons.

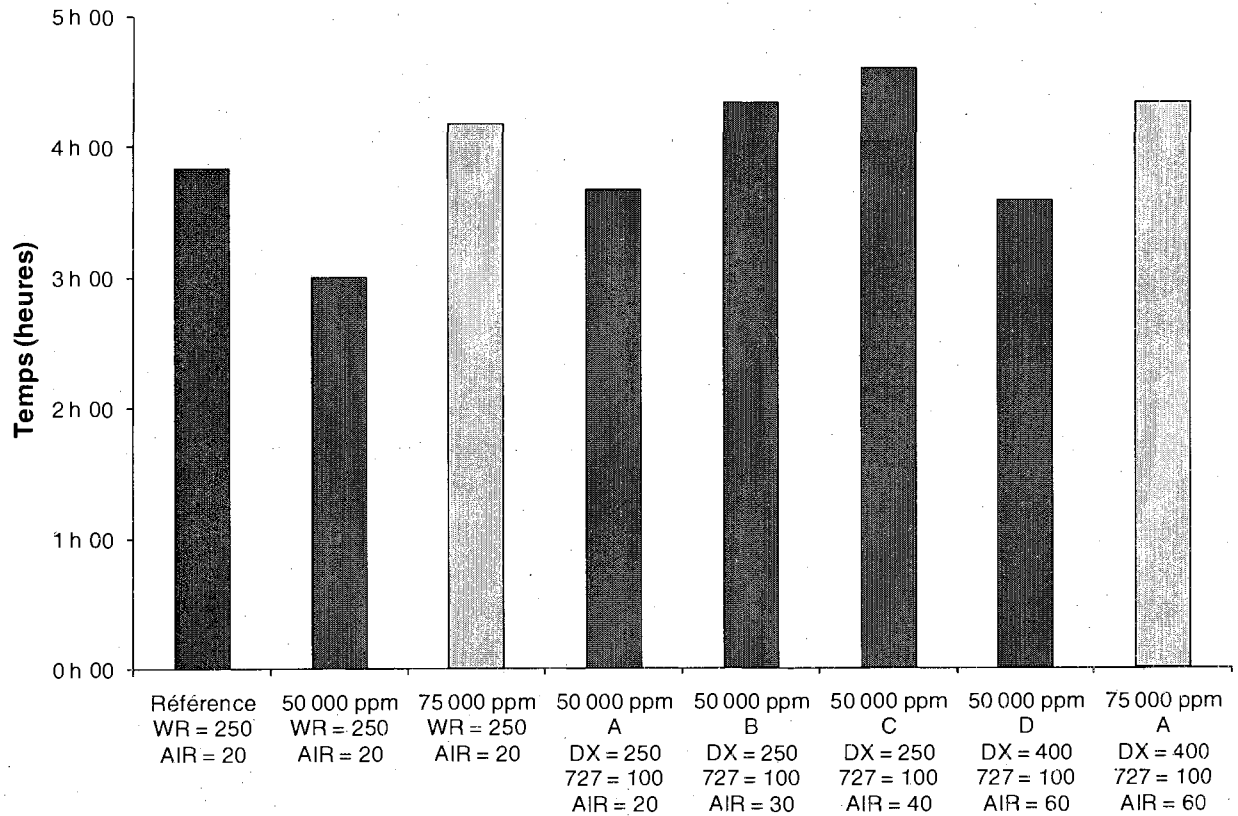


Figure 5.9 Temps de prise initial – 25 MPa avec air entraîné

La figure 5.9 présente l'influence de l'eau recyclée sur le temps de prise des bétons de 25 MPa avec air entraîné fabriqués avec des eaux de gâchage à 50 000 ppm et 75 000 ppm. Le temps de prise de la référence sans eau recyclée, légèrement inférieur à quatre heures, est en premier lieu très court pour un béton de 25 MPa. Bien que la littérature propose une diminution du temps de prise avec l'ajout d'eau recyclée, la référence à 75 000 ppm présente une augmentation du temps de prise de 30 minutes. Par contre, la référence à 50 000 ppm présente plutôt une diminution de 50 minutes. Il est donc difficile de conclure sur l'influence exacte de l'eau recyclée sur le temps de prise en observant les données de la figure 5.9.

Tous les mélanges adjuvantés, à 50 000 ppm et à 75 000 ppm, ne présentent pas de variations importantes du temps de prise, ce qui permet de conclure, tout comme la série 25 MPa SAE (figure 5.3), que l'eau recyclée influence peu le temps de prise des bétons de 25 MPa.

Les figures 5.10 et 5.11 présentent la résistance à la compression en fonction du temps et de l'adjuvantation des bétons avec eau recyclée. Les bétons fabriqués avec des eaux de gâchage à 50 000 et 75 000 ppm sont regroupés dans les figures 5.10 et 5.11 respectivement.

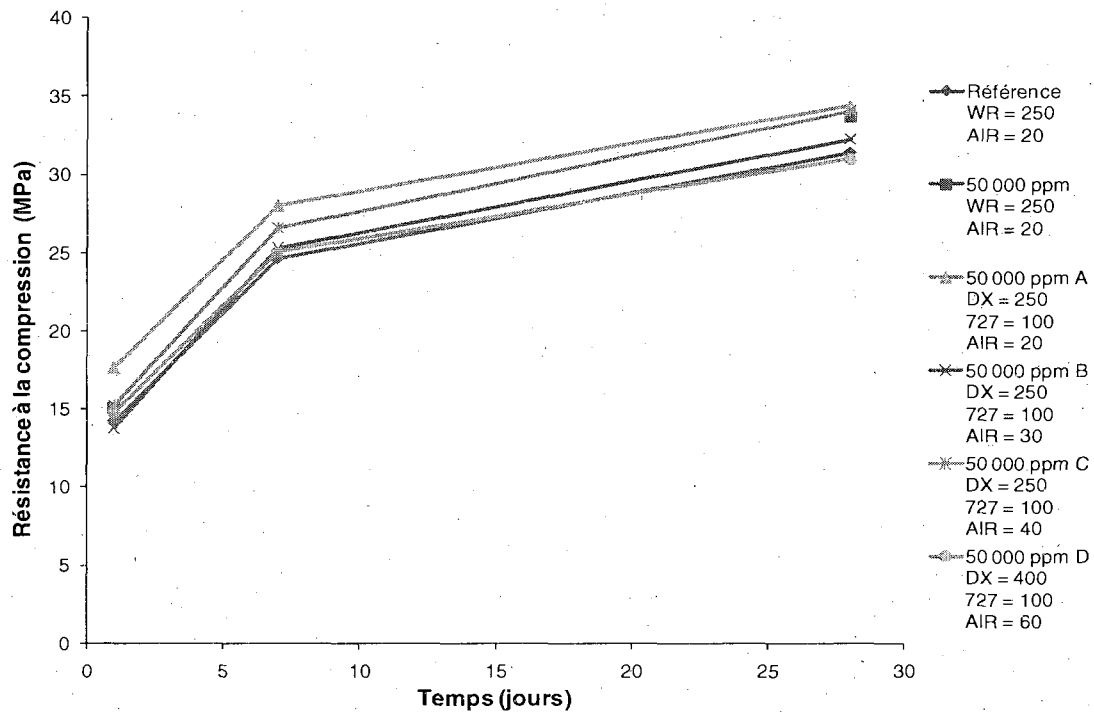


Figure 5.10 Résistance à la compression – 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm

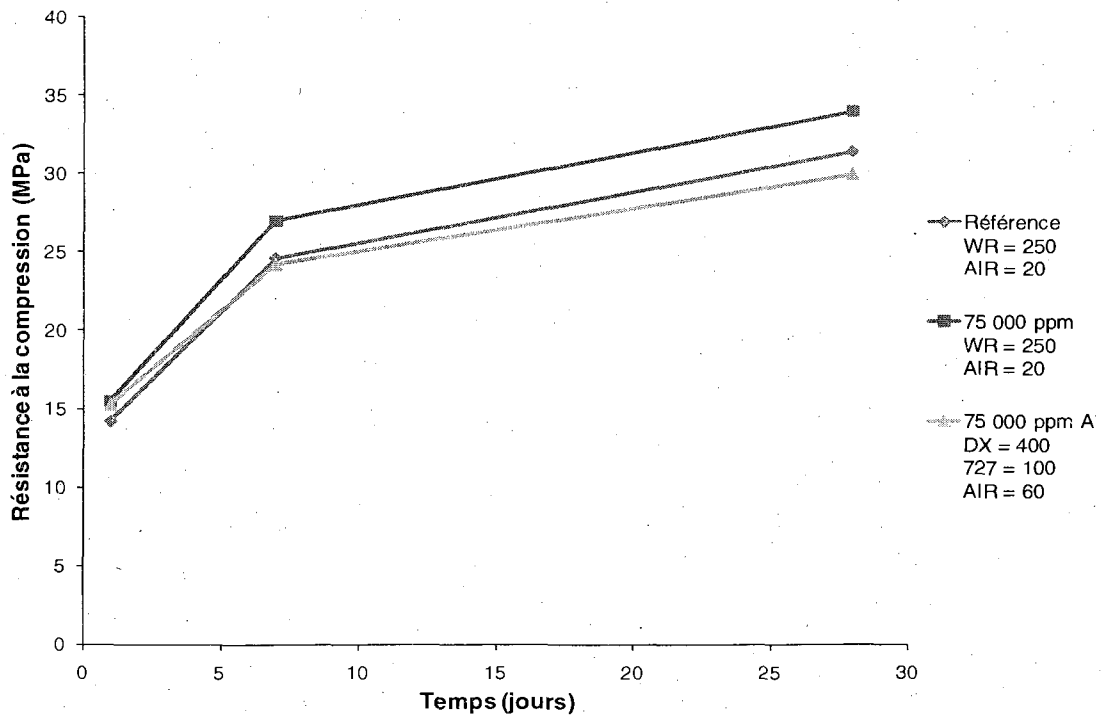


Figure 5.11 Résistance à la compression – 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm

Les résistances à 28 jours, toutes supérieures à 30 MPa, suggèrent que la formulation de béton utilisée est légèrement trop sécuritaire et que l'eau recyclée n'a que peu d'influence sur la résistance à la compression des bétons.

En comparant les bétons avec et sans eau recyclée, il est possible d'observer une légère augmentation de la résistance pour les bétons avec eau recyclée, particulièrement lorsque la dose de l'agent entraîneur d'air est faible. En effet, la référence à 0 ppm présente quasi toujours des résistances inférieures aux bétons avec eau recyclée. L'eau recyclée ne semble donc pas nuire aux résistances à la compression des bétons avec air entraîné (figures 5.10 et 5.11). Globalement, ces figures suggèrent que l'utilisation de l'eau recyclée tend à augmenter légèrement les résistances à la compression.

5.2. Bétons 25 MPa sans air entraîné

Les tableaux 5.3 et 5.4 présentent les caractéristiques des bétons de 25 MPa sans air entraîné fabriqués avec des eaux de gâchage à 46 000, 50 000 et 75 000 ppm. Le tableau 5.3 présente les résultats des bétons produits en laboratoire. Le tableau 5.4 présente les résultats obtenus en usine.

5.2.1. Essais en laboratoire

Le tableau 5.3 présente les résultats obtenus avec des bétons de 25 MPa sans air entraîné produits en laboratoire. Cette série de bétons est similaire à la série 1 précédente. Elle a été refaite pour atteindre, cette fois, un rapport E/C constant de 0,71 pour tous les bétons.

Les bétons du tableau 5.3 comportent un béton de référence, sans eau recyclée, et deux bétons produits avec des eaux de gâchage à 50 000 et 75 000 ppm sans modification de l'adjuvantation. L'adjuvantation des deux bétons (50 000 A et 75 000 A) a été modifiée pour ajuster le temps de prise.

Tableau 5.3 Résultats des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 2

| L-25SAE-2 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------|------|-------------------------|-------------------|----|----|----|-------------|-----|-----|-----|------------------|----|----|----|---------------------------|--|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | | Temps (j) | | |
| | | | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | | 1 | 7 | 28 |
| 0 ppm | 0,71 | WR = 250 | 125 | 95 | 75 | 65 | 2,0 | 2,2 | 2,0 | 2,0 | 21 | 21 | 21 | 22 | 5 h 20 | 10 | 19 | 25 |
| 50 000 ppm | 0,71 | WR = 250 | 30 | 30 | 20 | 10 | 1,9 | 2,1 | 2,1 | 1,9 | 26 | 25 | 24 | 23 | 3 h 45 | 15 | 24 | 32 |
| 75 000 ppm | 0,71 | WR = 250 | 45 | 40 | 40 | 20 | 1,9 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 24 | 23 | 24 | 23 | 3 h 40 | 11 | 19 | 28 |
| 50 000 ppm A | 0,71 | DX = 400 727 = 100 | 85 | 90 | 70 | 65 | 2,1 | 2,5 | 2,6 | 2,9 | 24 | 23 | 23 | 23 | 4 h 55 | 12 | 22 | 27 |
| 75 000 ppm A | 0,71 | DX = 400 727 = 100 | 55 | 40 | 35 | 30 | 1,8 | 2,4 | 2,3 | 2,8 | 22 | 22 | 22 | 21 | 4 h 35 | 12 | 24 | 30 |

5.2.2. Essais en usine

Le tableau 5.4 présente les résultats obtenus avec les bétons de 25 MPa sans air entraîné produits en usine. Pour chaque béton, la température, l'affaissement et la teneur en air sont présentés. Les premières mesures (Initiale) ont été prises à partir d'un échantillon de béton prélevé dans le camion immédiatement après le malaxage initial. La seconde mesure (Ajustée) a été prise après ajustement du béton par le technicien d'usine. L'ajustement du béton de référence a consisté à ajouter de l'eau pour augmenter l'affaissement (de 95 à 120 mm). L'ajustement du béton avec eau recyclée a consisté à ajouter du retardateur de prise (727 = 50 ml / 100 kg).

Tableau 5.4 Résultats des bétons 25 MPa sans air entraîné, série 3

| U-25-SAE-3 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|--------------|------|-------------------------|-------------------|---------|-----|-----|-------------|---------|-----|-----|------------------|----|----|------------------------|-----------------------------------|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (j) | | |
| | | | Initiale | Ajustée | 40 | 70 | Initiale | Ajustée | 40 | 70 | Initiale | 40 | 70 | | 1 | 7 | 28 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Référence | 0,70 | WR = 244 | 95 | 120 | 110 | 80 | — | — | — | 3,6 | 20 | 21 | 22 | 6 h 30 | 9 | 19 | 27 |
| 46 000 ppm A | 0,66 | WR = 221 727 = 50 | 160 | — | 140 | 140 | 3,6 | — | 3,8 | 4,0 | 21 | 22 | 21 | 6 h 30 | 9 | 20 | 27 |

5.3. Bétons 25 MPa avec air entraîné

Le tableau 5.5 présente les caractéristiques des bétons de 25 MPa avec air entraîné fabriqués avec des eaux de gâchage à 0, 50 000 et 75 000 ppm. Tous ces bétons ont été produits en laboratoire en utilisant un rapport E/C constant de 0,64.

5.3.1. Essais en laboratoire

Les résultats des bétons 25 MPa avec air entraîné de la série 2 sont présentés au tableau 5.5. Cette série de bétons comporte deux bétons de référence pour pouvoir estimer la répétabilité des résultats. Deux bétons ont été fabriqués avec des eaux de gâchage à 50 000 et 75 000 ppm sans modification de l'adjuvantation. La série est complétée par quatre bétons produits avec une eau à 50 000 ppm et deux bétons avec une eau à 75 000 ppm. Pour ces six bétons, l'adjuvantation a été modifiée dans le but de compenser les effets de l'eau recyclée.

Tableau 5.5 Résultats des bétons 25 MPa avec air entraîné, série 2

| L-25AE-2 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------|------|------------------------------------|-------------------|-----|-----|----|-------------|-----|-----|-----|------------------|----|----|----|------------------------|-----------------------------------|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | | Temps (j) | | |
| | | | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | | 1 | 7 | 28 |
| Référence | 0,64 | WR = 250 AIR = 20 | 135 | 110 | 70 | 55 | 4,3 | 3,7 | 3,7 | 3,4 | 22 | 23 | 22 | 23 | 5 h 10 | 12 | 21 | 26 |
| Référence 2 | 0,64 | WR = 250 AIR = 70 | 175 | 165 | 140 | 95 | 8,0 | 8,0 | 7,0 | 6,0 | 23 | 23 | 23 | 24 | 5 h 45 | 7 | 15 | 20 |
| 50 000 ppm | 0,64 | WR = 250 AIR = 20 | 65 | 50 | 35 | 25 | 3,0 | 2,9 | 2,3 | 2,5 | 23 | 23 | 24 | 23 | 3 h 25 | 13 | 21 | 28 |
| 75 000 ppm | 0,64 | WR = 250 AIR = 20 | 40 | 35 | 25 | 20 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,4 | 23 | 23 | 23 | 23 | 3 h 25 | 14 | 22 | 28 |
| 50 000 ppm A | 0,64 | DX = 400 727 = 100 AIR = 60 | 90 | 75 | 60 | 55 | 4,0 | 4,0 | 3,6 | 3,4 | 25 | 24 | 24 | 24 | 5 h 30 | 12 | 21 | 27 |
| 50 000 ppm B | 0,64 | DX = 400 727 = 100 AIR = 100 | 105 | 80 | 40 | 30 | 5,7 | 5,7 | 4,5 | 4,3 | 26 | 25 | 25 | 25 | 4 h 30 | 13 | 20 | 26 |
| 50 000 ppm C | 0,64 | DX = 400 727 = 100 AIR = 130 | 80 | 70 | 50 | 35 | 5,9 | 5,8 | 5,2 | 4,9 | 26 | 26 | 26 | 25 | 4 h 45 | 12 | 19 | 25 |
| 50 000 ppm D | 0,64 | DX = 400 727 = 100 AIR = 200 | 125 | 105 | 50 | 40 | 9,0 | 9,0 | 7,2 | 6,2 | 28 | 27 | 29 | 27 | 4 h 15 | 10 | 16 | 20 |
| 75 000 ppm A | 0,64 | DX = 400 727 = 100 AIR = 60 | 55 | 50 | 30 | 25 | 3,5 | 3,1 | 2,7 | 3,0 | 26 | 25 | 24 | 24 | 4 h 35 | 15 | — | 30 |
| 75 000 ppm B | 0,64 | DX = 400 727 = 100 AIR = 100 | 25 | 20 | 10 | 15 | 4,4 | 4,4 | 4,2 | 3,9 | 26 | 25 | 25 | 24 | 3 h 55 | 15 | 24 | 28 |

5.4. Bétons 30 MPa sans air entraîné

Les tableaux 5.6 et 5.7 présentent les caractéristiques des bétons de 30 MPa sans air entraîné fabriqués avec des eaux de gâchage à 44 000, 50 000 et 75 000 ppm. Le tableau 5.6 regroupe les résultats obtenus en laboratoire alors que le tableau 5.7 regroupe les résultats obtenus en usine.

5.4.1. Essais en laboratoire

Le tableau 5.6 présente les résultats obtenus avec des bétons de 30 MPa sans air entraîné. Cette série de bétons a été produite avec un rapport E/C constant de 0,65. Elle comprend un béton de référence sans eau recyclée et deux bétons avec eau recyclée produit sans modification de l'adjuvantation (50 000 et 75 000 ppm). Trois bétons à 50 000 ppm ont été produits en utilisant un superplastifiant et un retardateur de prise. Le dernier béton a été produit avec une eau de gâchage à 75 000 ppm en utilisant un superplastifiant et un retardateur de prise.

Tableau 5.6 Résultats des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 2

| L-30SAE-2 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------|------|----------------------------|-------------------|----|----|----|-------------|-----|-----|-----|------------------|----|----|----|------------------------|-----------------------------------|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | | Temps (j) | | |
| | | | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | | 1 | 7 | 28 |
| Référence | 0,65 | WR = 250 | 85 | 80 | 60 | 45 | 1,7 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 27 | 26 | 27 | 27 | 4 h 25 | 15 | 24 | 30 |
| 50 000 ppm | 0,65 | WR = 250 | 55 | 45 | 50 | 20 | 2,0 | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 24 | 24 | 24 | 24 | 3 h 35 | 14 | 22 | 31 |
| 75 000 ppm | 0,65 | WR = 250 | 25 | 30 | 20 | 10 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 24 | 23 | 23 | 23 | 3 h 10 | 15 | 23 | 32 |
| 50 000 ppm A | 0,65 | p341 = 300 727 = 100 | 130 | 90 | 65 | 40 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 24 | 25 | 25 | 25 | 3 h 25 | 13 | 22 | 28 |
| 50 000 ppm B | 0,65 | p341 = 300 727 = 150 | 85 | 70 | 45 | 25 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 25 | 24 | 25 | 24 | 3 h 55 | 14 | 23 | 31 |
| 50 000 ppm C | 0,65 | p341 = 400 727 = 200 | 115 | 95 | 60 | 50 | 2,2 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 25 | 25 | 25 | 25 | 3 h 50 | 13 | 24 | 30 |
| 75 000 ppm D | 0,65 | p341 = 650 727 = 250 | 165 | 80 | 40 | 20 | 3,0 | 2,4 | 2,1 | 2,5 | 27 | 27 | 27 | 28 | 3 h 00 | 15 | 25 | 32 |

5.4.2. Essais en usine

Le tableau 5.7 présente les résultats des bétons de 30 MPa sans air entraîné fabriqués en usine. Pour chaque béton, la température, l'affaissement et la teneur en air sont présentés. Comme tous les bétons fabriqués en usine, les premières mesures (Initiale) ont été prises à partir d'un échantillon de béton prélevé dans le camion immédiatement après le malaxage initial. La seconde mesure (Ajustée) a été prise après ajustement du béton par le technicien d'usine. L'ajustement du béton de référence a consisté à ajouter de l'eau pour augmenter l'affaissement (de 95 à 130 mm). Dans le béton avec eau recyclée, aucun essai n'a été effectué avant l'ajout de retardateur de prise (727 = 50 ml / 100 kg) dans le but d'augmenter le temps de prise.

Tableau 5.7 Résultats des bétons 30 MPa sans air entraîné, série 3

| U-30-SAE-3 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|--------------|------|-------------------------|----------------------|---------|-----|-----|-------------|---------|-----|-----|---------------------|----|----|---------------------------|--|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (j) | | |
| | | | Initiale | Ajustée | 40 | 70 | Initiale | Ajustée | 40 | 70 | Initiale | 40 | 70 | | 1 | 7 | 28 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Référence | 0,60 | WR = 242 | 95 | 130 | 90 | 85 | — | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 22 | 23 | 23 | 5 h 55 | 10 | 24 | 32 |
| 44 000 ppm A | 0,60 | WR = 241 727 = 59 | — | 145 | 120 | 100 | — | 3,2 | 2,8 | 2,9 | 21 | 20 | 22 | 6 h 20 | 10 | 25 | 33 |

5.5. Bétons 35 MPa air entraîné

Les tableaux 5.8 et 5.9 présentent les caractéristiques des bétons de 35 MPa avec air entraîné fabriqués avec des eaux de gâchage à 46 000, 50 000, 54 000 ppm et 107 000 ppm. Le tableau 5.8 regroupe les résultats obtenus en laboratoire alors que le tableau 5.9 regroupe les résultats obtenus en usine.

5.5.1. Essais en laboratoire

Le tableau 5.8 présente les bétons de 35 MPa avec air fabriqués en laboratoire avec un rapport E/C constant de 0,45. Une référence sans eau recyclée et cinq bétons avec de l'eau de gâchage à 50 000 ppm ont été fabriqués. Tous les bétons fabriqués avec de l'eau recyclée contiennent une adjuvantation différente du béton de référence. Les cinq bétons adjuvantés contiennent la même dose de retardateur de prise (250 ml / 100 kg) puisque le temps de prise était adéquat. Quatre bétons (A, B, C et E) contiennent du Plastol 341 comme superplastifiant. La quantité d'agent entraîneur d'air a variée beaucoup dans ces quatre mélanges afin d'obtenir le volume d'air souhaité. Un béton (D) contient du Eucon 37 afin d'établir une comparaison avec le Plastol 341.

Tableau 5.8 Résultats des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 2

| L-35SAE-2 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------|------|--------------------------------------|-------------------|-----|-----|----|-------------|------|------|------|------------------|----|----|----|------------------------|-----------------------------------|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | | Temps (j) | | |
| | | | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | 10 | 20 | 50 | 80 | | 1 | 7 | 28 |
| Référence | 0,45 | Dx = 230 AIR = 200 | 125 | 120 | 90 | 70 | 6,5 | 6,4 | 6,4 | 6,0 | 26 | 26 | 27 | 27 | 5 h 10 | 18 | 25 | 28 |
| 50 000ppm A | 0,45 | p341 = 550 727 = 250 AIR = 400 | 165 | 150 | 135 | 80 | 12,0 | 12,2 | 15,0 | 12,0 | 28 | 28 | 29 | 29 | 5 h 05 | 11 | 15 | 18 |
| 50 000ppm B | 0,45 | p341 = 450 727 = 250 AIR = 200 | 145 | 115 | 75 | 40 | 13,5 | 12,0 | 10,5 | 6,2 | 26 | 26 | 26 | 26 | 4 h 45 | 16 | 20 | 25 |
| 50 000ppm C | 0,45 | p341 = 400 727 = 250 AIR = 30 | 155 | 115 | 55 | 30 | 6,9 | 5,6 | 3,3 | 2,6 | 25 | 25 | 25 | 25 | 3 h 30 | 26 | 33 | 43 |
| 50 000 ppm D | 0,45 | E37 = 750 727 = 250 AIR = 200 | 155 | 110 | 65 | 40 | 7,8 | 7,5 | 5,4 | 4,3 | 25 | 25 | 26 | 26 | 4 h 15 | 20 | 28 | 34 |
| 50 000 ppm E | 0,45 | p341 = 550 727 = 250 AIR = 40 | 205 | 200 | 120 | 50 | 9,0 | 8,8 | 7,0 | 3,5 | 26 | 25 | 26 | 26 | 3 h 55 | 22 | 29 | 37 |

5.5.2. Essais en usine

Le tableau 5.9 présente quatre bétons de 35 MPa avec air entraîné effectués en usine avec des concentrations différentes d'eau de gâchage. Un béton de référence sans eau recyclée a également été fabriqué. Lors de ce mélange, la quantité d'agent entraîneur d'air a été ajustée. Elle était initialement de 155 ml / 100 kg et 31 ml / 100 kg ont été ajoutée pour augmenter la teneur en air. Cette variation est indiquée dans la colonne adjuvant du tableau. Pour le béton fabriqué avec de l'eau de gâchage à 46 000 ppm, l'adjuvantation est quasi la même que pour le béton de référence et la quantité d'agent entraîneur d'air a également été ajustée. Le béton 54 000 ppm A contient du superplastifiant Eucon 37 : 122 ml / 100 kg ont été ajoutés afin d'augmenter l'affaissement et la maniabilité du béton. De l'agent entraîneur d'air a également été ajouté à ce mélange. Un mélange contenant de l'eau de gâchage à 107 000 ppm a été effectué afin de voir les effets de l'eau recyclée très concentrée. Dans ce mélange, du superplastifiant Eucon 37 a été ajouté tout comme de l'agent entraîneur d'air.

Tableau 5.9 Résultats des bétons 35 MPa avec air entraîné, série 3

| U-35-SAE-3 | E/C | Adjuvants (ml/100kg) | Affaissement (mm) | | | | Air (%) | | | | Température (°C) | | | Temps prise (heure) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|------------------|------|--|----------------------|---------|----|----|-------------|---------|-----|-----|---------------------|----|----|---------------------------|--|----|----|
| | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (min) | | | | Temps (j) | | |
| | | | Initiale | Ajustée | 40 | 70 | Initiale | Ajustée | 40 | 70 | Initiale | 40 | 70 | | 1 | 7 | 28 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Référence | 0,43 | Dx =227 727 = 61 AIR = 155+31 | 90 | 100 | 90 | 80 | 4,9 | 7,0 | 7,6 | 7,3 | 20 | 21 | 22 | 7 h 10 | 16 | 28 | 35 |
| 46 000 ppm | 0,43 | Dx =220 727 = 67 AIR = 153+31 | 80 | 100 | 90 | 90 | 4,6 | 6,3 | 7,3 | 7,4 | 21 | 23 | 23 | 6 h 55 | 14 | 28 | 33 |
| 54 000 ppm A | 0,39 | Dx =220 E37 = 0+122 727 = 67 AIR = 153+24 | 85 | 95 | 90 | 90 | 5,0 | 6,2 | 6,4 | 6,9 | 21 | 22 | 22 | 7 h 05 | 16 | 30 | 37 |
| 107 000 ppm A | 0,37 | Dx =229 E37 = 0+186 727 = 62 AIR = 156+19 | 85 | 85 | 85 | 80 | 5,5 | 7,0 | 7,2 | 7,0 | 23 | 23 | 23 | 6 h 50 | 13 | 28 | 36 |

6. ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre analyse les résultats présentés au chapitre 5. Des graphiques permettront de mettre en lumière certaines caractéristiques afin de mieux comprendre les effets de l'eau recyclée sur les différentes propriétés du béton. Les propriétés qui seront discutées sont les suivantes : l'affaissement, la teneur en air, la température, la stabilité du réseau de bulles d'air, le temps de prise, la résistance à la compression et la durabilité aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage. La variation dans le choix et les quantités d'adjuvants utilisés pour chaque mélange seront détaillés. Cela permettra d'optimiser la compensation des effets de l'eau recyclée par l'utilisation des adjuvants appropriés.

6.1. Propriétés du béton frais en laboratoire

6.1.1. Affaissement

6.1.1.1. 25 MPa sans air entraîné

La figure 6.1 présente l'affaissement à 10 minutes des bétons de laboratoire de 25 MPa sans air entraîné. Un béton de référence, sans eau recyclée, ainsi que deux bétons sans modification de l'adjuvantation sont présentés (50 000 et 75 000 ppm). Deux autres bétons, dont l'adjuvantation a été modifiée, sont également présentés (50 000 ppm A et 75 000 ppm A).

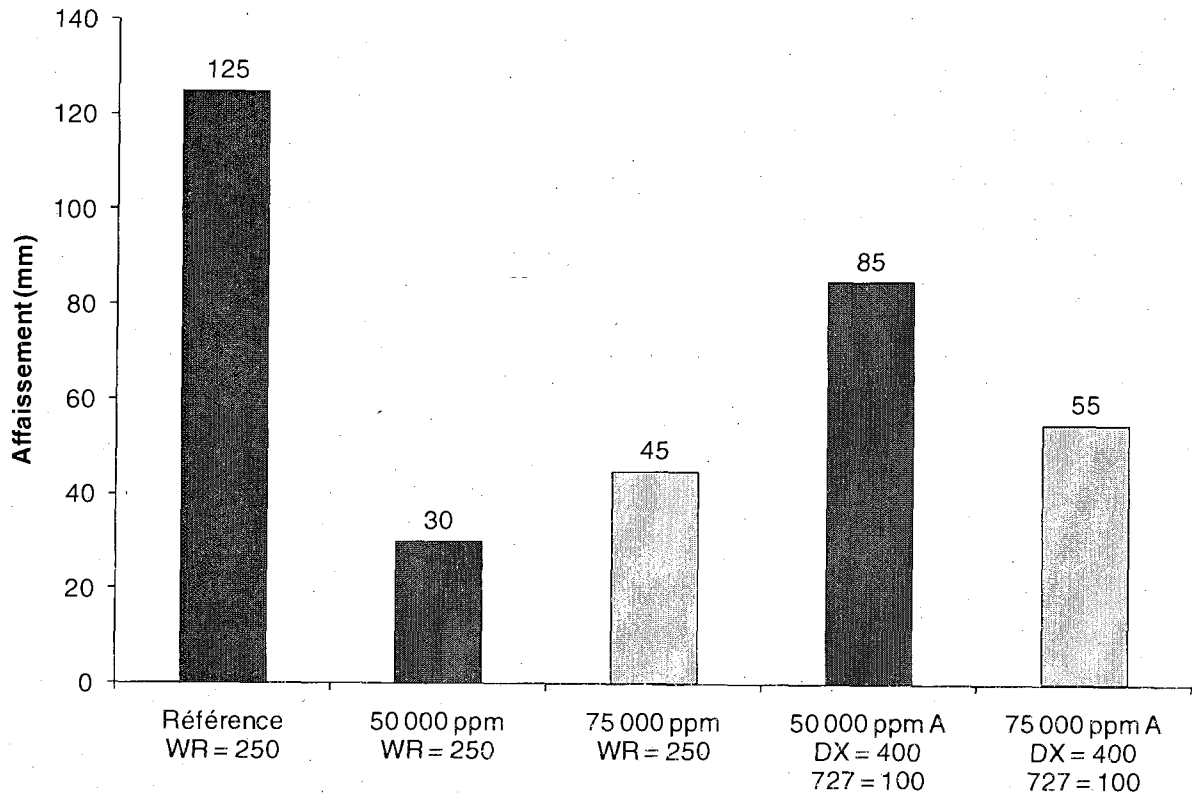


Figure 6.1 Affaissement à 10 minutes - 25 MPa sans air entrainé

La figure 6.1 montre une baisse importante de l'affaissement initial lorsque de l'eau recyclée est utilisée. L'affaissement de la référence (125 mm) est diminué à seulement 30 mm lorsque l'eau est concentrée à 50 000 ppm. Il semblait plausible de croire que cette diminution serait encore plus marquée pour une concentration de 75 000 ppm, ce qui n'est cependant pas le cas. Par contre, la différence est minime entre un affaissement de 30 mm (50 000 ppm) et de 45 mm (75 000 ppm). Un écart de seulement 15 mm l'essai d'affaissement n'est pas très significatif. Lorsque des adjuvants sont incorporés, l'affaissement est plus élevé. Cela est principalement associé à la dose élevée d'Eucon Dx qui a pour fonction principale d'augmenter la maniabilité du béton. À 50 000 ppm A, l'affaissement de 85 mm est acceptable, alors que le mélange 75 000 ppm A (55 mm) présente un affaissement faible. Suite à la réalisation de ces mélanges, il semble possible d'obtenir un affaissement initial adéquat avec de l'eau recyclée concentrée à 50 000 ppm, mais ce n'est pas le cas lorsque l'eau recyclée est concentrée à 75 000 ppm.

Après avoir présenté les affaissements initiaux à la figure 6.1, la figure 6.2 montre la variation de l'affaissement dans le temps. Les mêmes bétons présentés à la figure 6.1 sont présentés sur la figure 6.2.

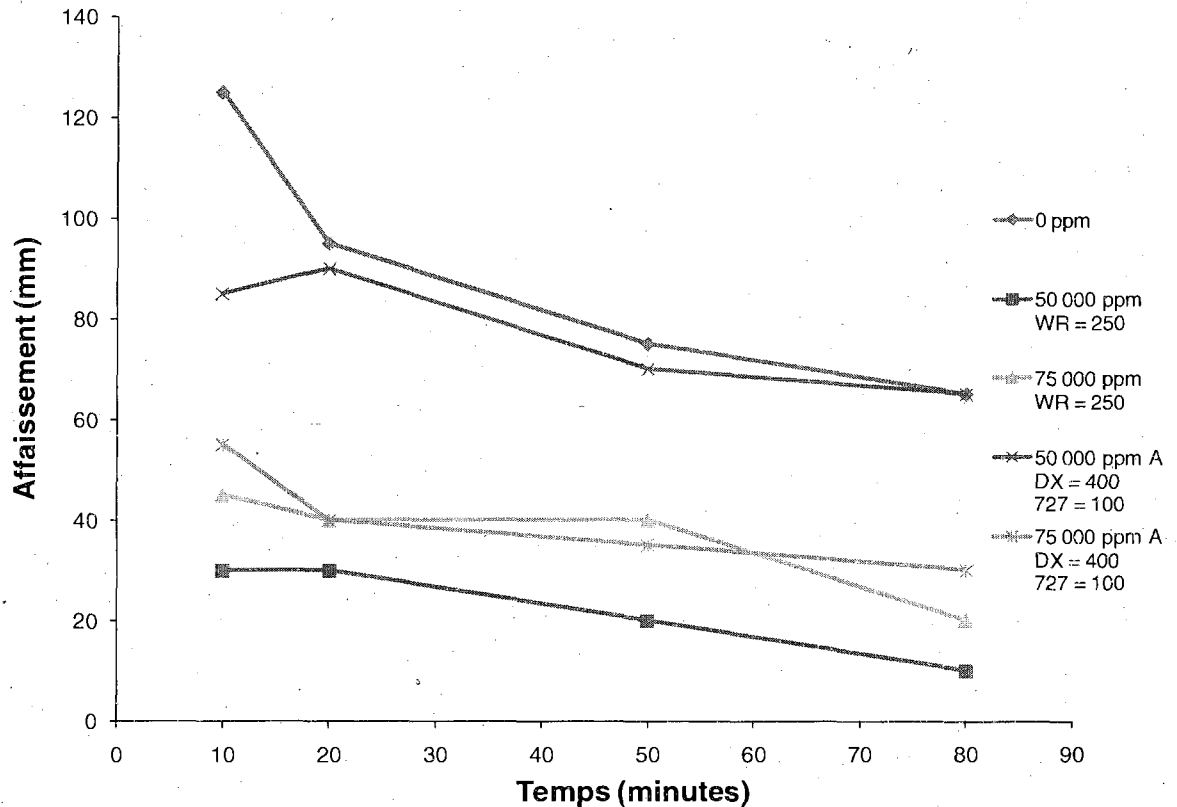


Figure 6.2 Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa sans air entrainé

La référence à 0 ppm à un affaissement initial très élevée, une perte de 30 mm est observée entre 10 et 20 minutes. Les mélanges contenant de l'eau recyclée, mais seulement 250 ml d'Eucon WR, ont un affaissement très faible (25 SAE 50 et 25 SAE 75). Étonnamment, l'affaissement est légèrement plus élevé pour le mélange à 75 000 ppm que pour le mélange à 50 000 ppm.

Le mélange 50 000 ppm A est acceptable pour le critère d'affaissement, d'autant plus que la perte dans le temps est minime (20 mm en 80 minutes). Pour le mélange 75 000 ppm A, la dose d'Eucon Dx étant déjà considérablement élevée, la meilleure option afin d'augmenter

l'affaissement aurait été l'ajout d'un superplastifiant. Or, l'ajout d'un superplastifiant ne serait pas économiquement viable sans apporter aucune modification à la formule du mélange.

Les résultats pour l'affaissement initial des bétons 25 MPa AE sont présentés à la figure 6.3. Deux références sans eau recyclée sont présentés (Référence et Référence 2). Un mélange, contenant une eau de gâchage à 50 000 ppm mais aucune modification de l'adjuvantation, est également présenté. Par la suite, quatre mélanges (A, B, C et D) ont été fabriqués en variant la quantité d'agent entraîneur d'air. Sur cet histogramme, la dernière ligne indique le dosage d'agent entraîneur d'air (ml / 100 kg de ciment) suivi du volume total d'air dans le mélange à 10 minutes.

6.1.1.2. 25 MPa avec air entraîné

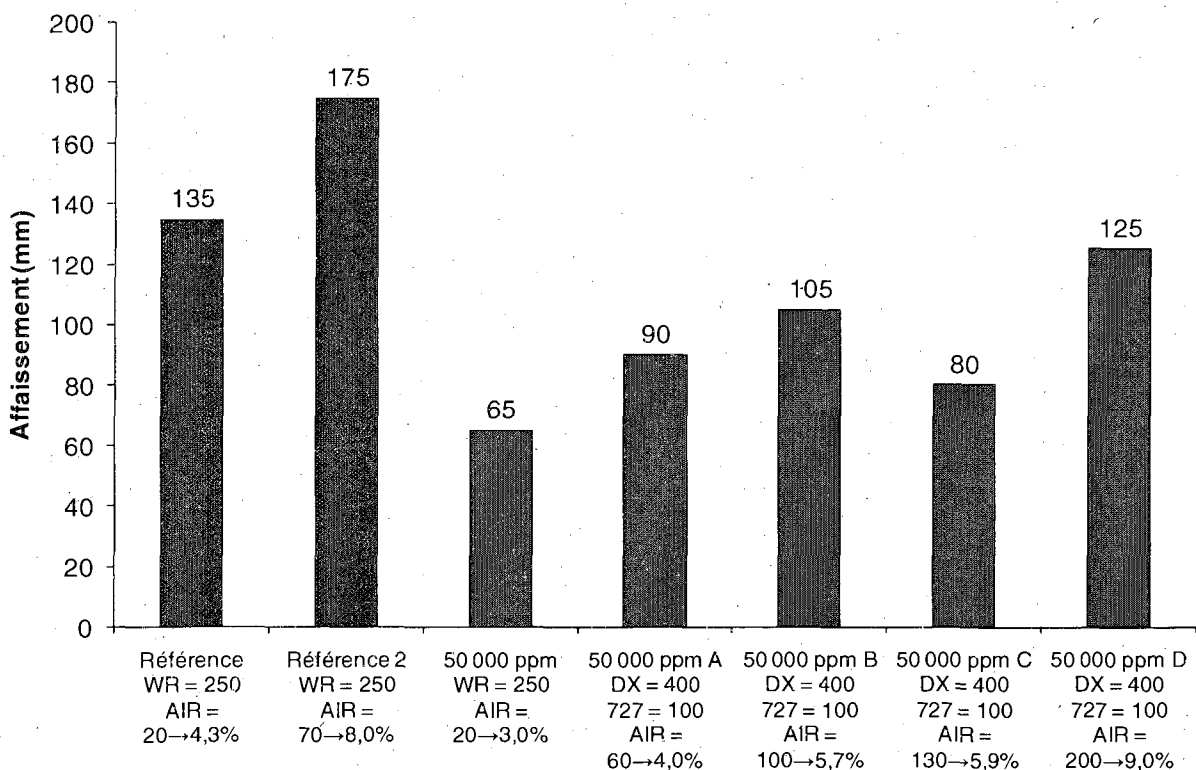


Figure 6.3 Affaissement à 10 minutes - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm

Les deux références présentent un affaissement supérieur à la plage fixée (entre 80 et 100 mm). Encore une fois, lorsque de l'eau recyclée a été ajoutée, sans corriger l'adjuvantation en conséquence, la perte d'affaissement est drastique (135 mm pour la référence à 0 ppm avec 20 ml d'Air Extra et seulement 65 mm pour ce même mélange avec de l'eau à 50 000 ppm). Quant aux mélanges adjuvantés avec du DX, les affaissements initiaux sont quasi tous acceptables. Seul l'affaissement du mélange adjuvanté 4 est légèrement trop élevé, ce qui peut être attribué au volume d'air plus important (9 %).

La figure 6.4 présente les deux mêmes références à 0 ppm que la figure 6.3, ainsi qu'un mélange à 75 000 ppm sans modification de l'adjuvantation et deux mélanges à 75 000 ppm dont l'adjuvantation a été modifiée (A et B).

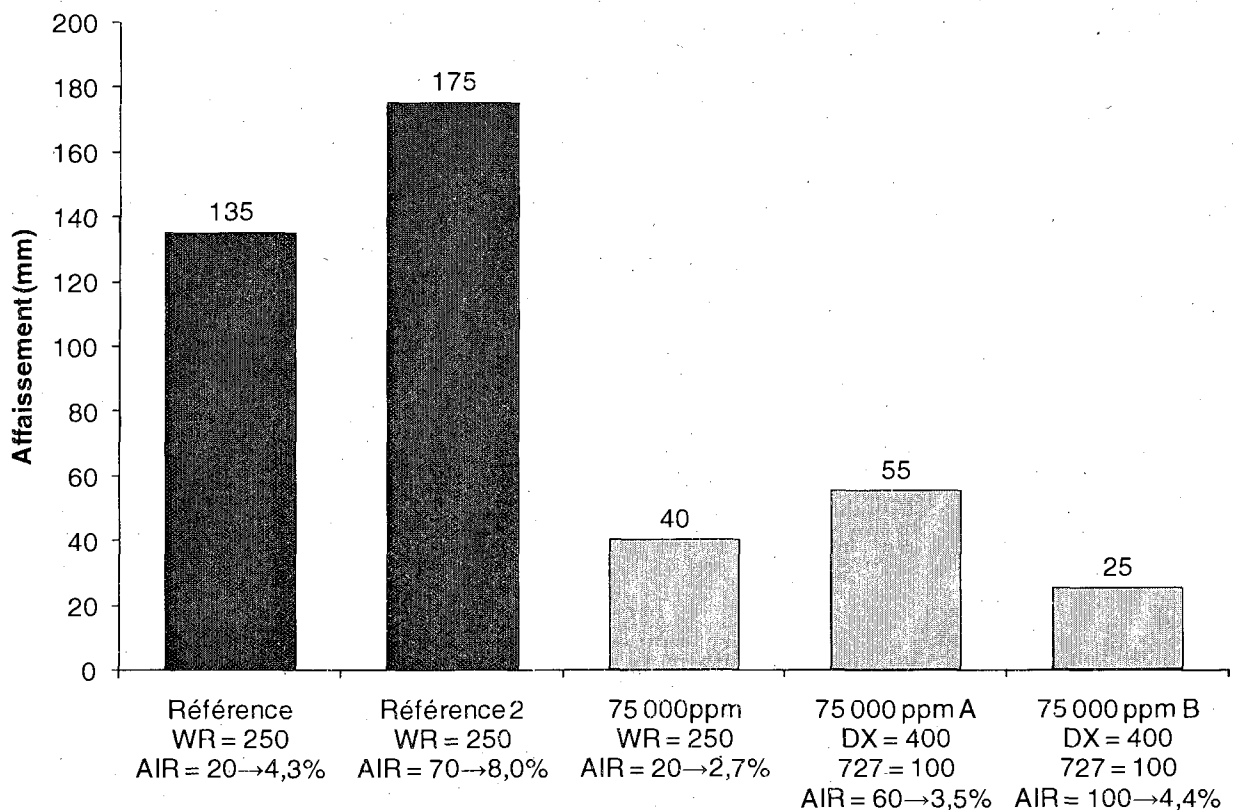


Figure 6.4 Affaissement à 10 minutes - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm

Les affaissements sont faibles, même pour les mélanges dont l'adjuvantation a été ajustée. Il semble à nouveau que lorsque l'eau est concentrée à 75 000 ppm, il serait nécessaire d'ajouter

du superplastifiant afin d'augmenter la maniabilité, et cette option n'est pas viable économiquement pour des bétons de 25 MPa vu le prix élevé des superplastifiants. Les mélanges 25 AE 75 A et 25 AE 75 B ne démontrent pas une correction adéquate des effets provoqués par l'utilisation de l'eau recyclée.

Les figures 6.5 et 6.6 présentent les mêmes bétons que les figures 6.3 et 6.4. Cependant, la variation de l'affaissement dans le temps (10, 20, 50 et 80 minutes) est présentée, comparativement aux figures 6.3 et 6.4 qui présentaient seulement l'affaissement initial.

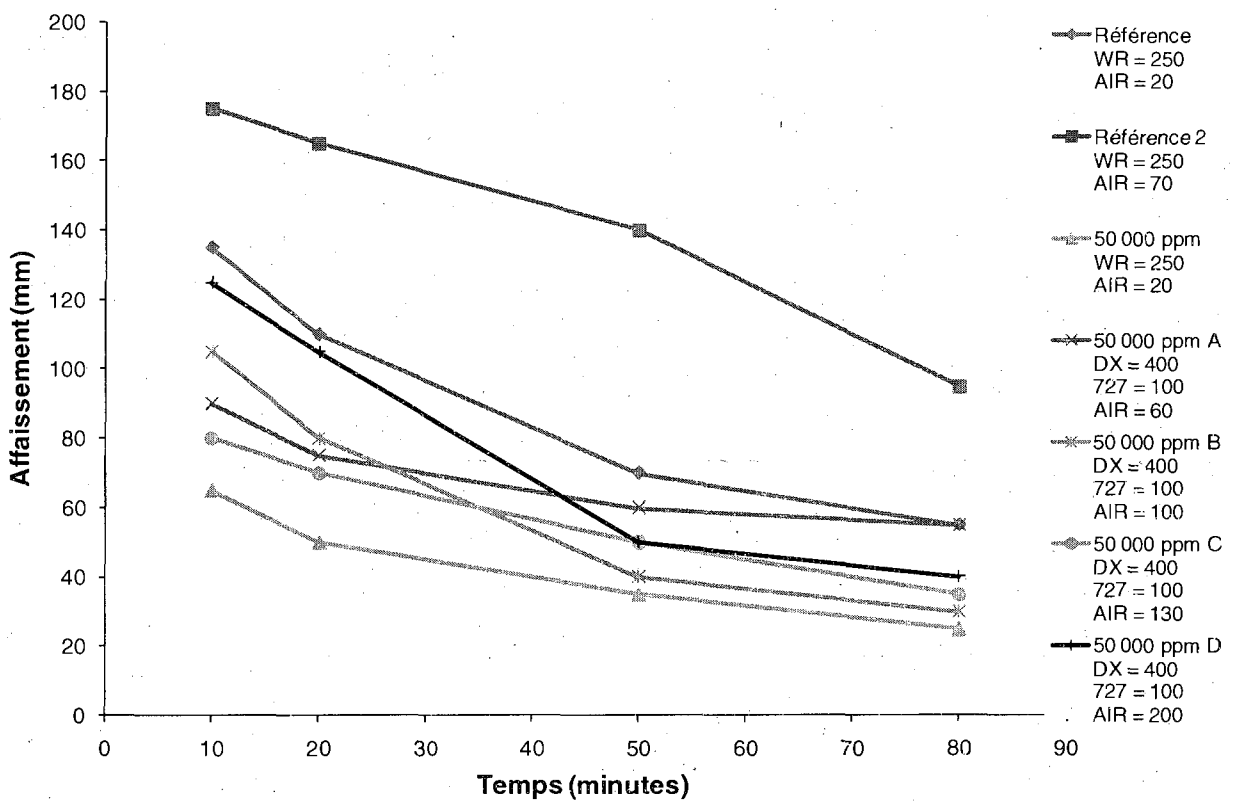


Figure 6.5 Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa air entrainé, 50 000 ppm

La variation de l'affaissement dans le temps des bétons 25 MPa AE 50 000 ppm (figure 6.5) présente presque toujours la même courbe. Les deux références sans eau recyclée présentent les affaissements les plus élevés. La référence 2 à 0 ppm débute avec un affaissement très élevé, mais qui chute de 80 mm en 70 minutes, ce qui est peu avantageux.

Pour les mélanges 50 000 ppm dont l'adjuvantation est ajustée, une perte d'environ 30 mm est généralement observable entre 10 et 80 minutes. Le mélange 25 AE 50 A présente la meilleure correction de l'affaissement dans le temps. Les mélanges 25 AE 50 B, 25 AE 50 C et 25 AE 50 D présentent tous des comportements semblables. L'affaissement initial est adéquat, en moyenne de 100 mm, mais les pertes dans le temps sont marquées et les affaissements finaux demeurent faibles (35 mm en moyenne). L'affaissement initial des bétons 25 AE contenant de l'eau recyclée à 50 000 ppm est donc adéquat initialement mais n'est pas complètement compensé à long terme lors des essais en laboratoire.

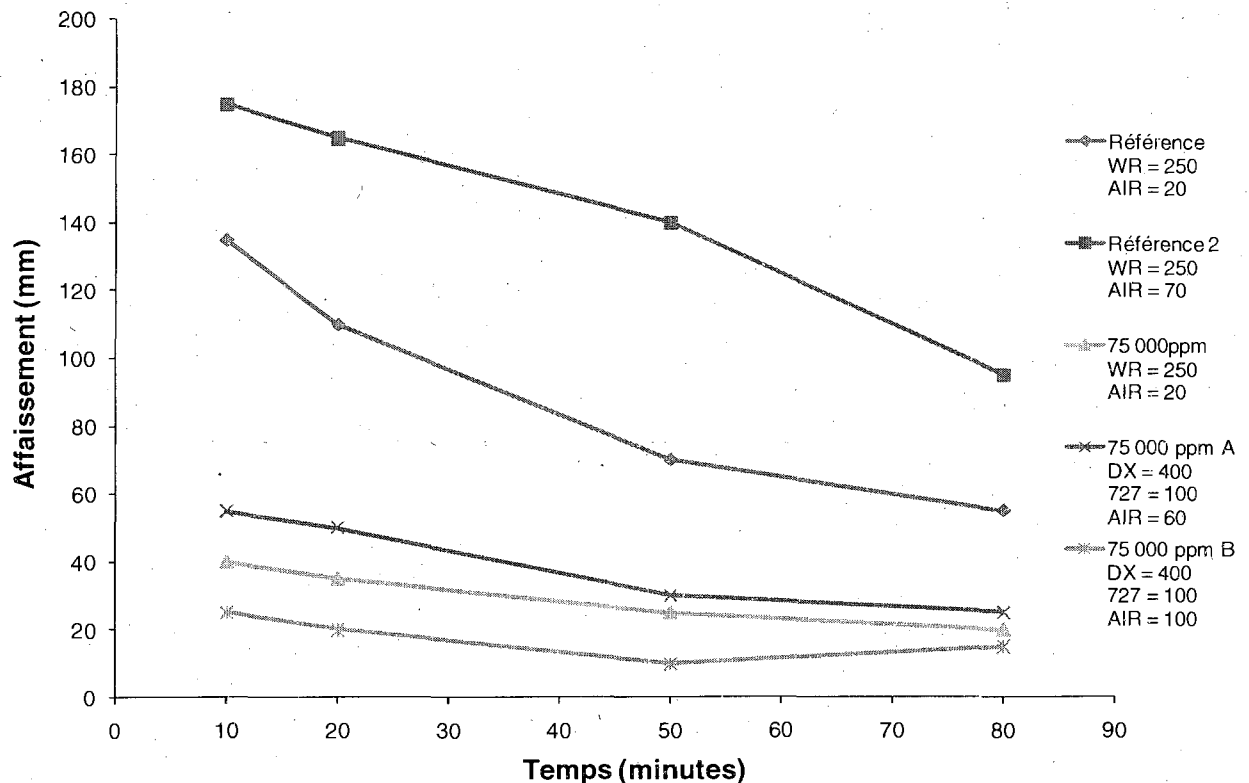


Figure 6.6 Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa air entrainé, 75 000 ppm

Lorsque l'eau recyclée est concentrée à 75 000 ppm (figure 6.6), les affaissements initiaux sont faibles et sont quasi nuls après 80 minutes. Ces mélanges ne présentent aucune maniabilité et le béton serait trop difficile à placer pour être acceptable. Il faut dire que la teneur en air est particulièrement faible pour des mélanges avec air entrainé (3,5 % et 4,4 % tel que présenté à la figure 6.4). Suite aux essais réalisés en laboratoire sur les bétons 25 AE 75, il ne semble pas conseillé de fabriquer des bétons avec de l'eau concentrée à 75 000 ppm.

6.1.1.3. 30 MPa sans air entraîné

La figure 6.7 présente l'affaissement initial des bétons de 30 MPa sans air entraîné. Trois mélanges fabriqués avec la même adjuvantation contiennent de l'eau de gâchage à 0, 50 000 et 75 000 ppm. Trois autres mélanges contiennent de l'eau de gâchage à 50 000 ppm et des variations dans l'adjuvantation (50 000 ppm, A, B et C). Un seul mélange contient de l'eau de gâchage à 75 000 ppm avec variation de l'adjuvantation (75 000 ppm A).

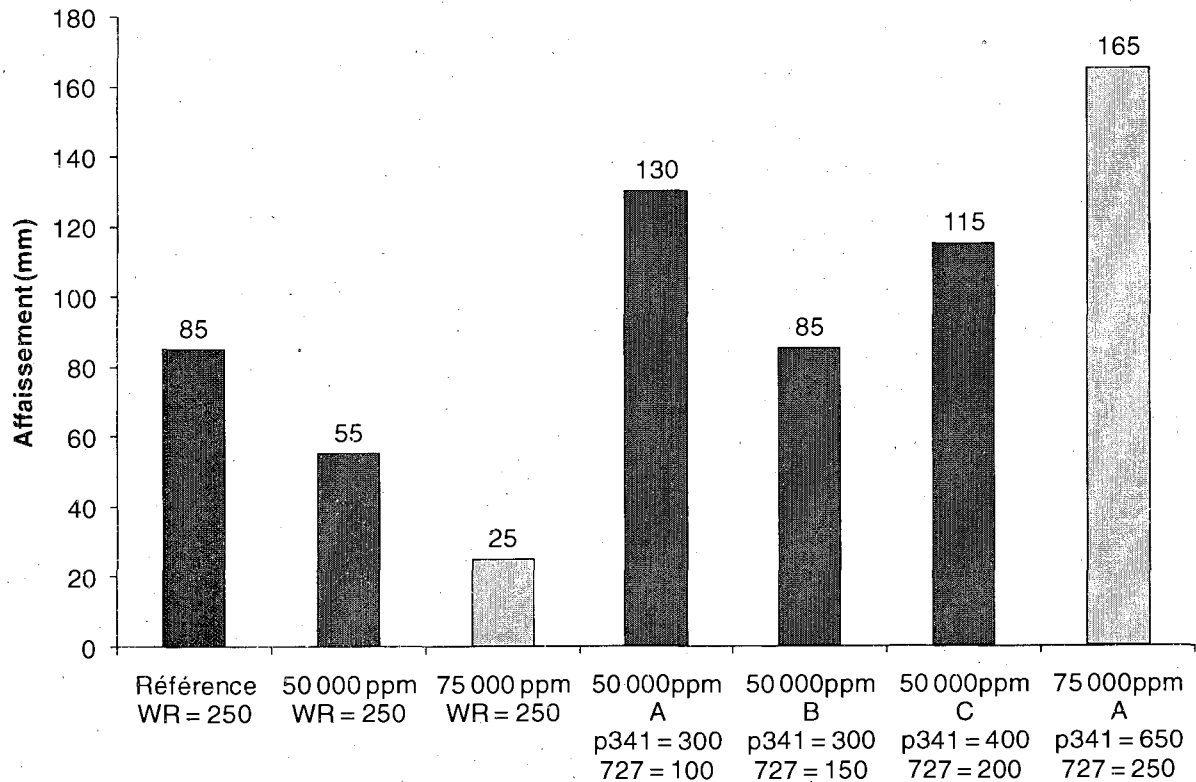


Figure 6.7 Affaissement à 10 minutes - 30 MPa sans air entraîné

La figure 6.7 présente exactement l'effet appréhendé par l'utilisation de l'eau recyclée. Initialement, la référence à 0 ppm a un affaissement de 85 mm, qui est diminué à 55 mm lorsque l'eau recyclée est à 50 000 ppm et jusqu'à 25 mm lorsque l'eau est à 75 000 ppm. Or, l'ajout de Plastol 341 augmente considérablement la maniabilité des bétons. Les résultats demeurent acceptables pour l'eau concentrée à 50 000 ppm, soient les mélanges 30 SAE 50 A, 30 SAE 50 B et 30 SAE 50 C. Cependant, l'affaissement initial de 165 mm pour le béton 30 SAE 75 A est particulièrement élevé et risque de ne pas se maintenir dans le temps.

La figure 6.8 présente la variation de l'affaissement de ces bétons dans le temps.

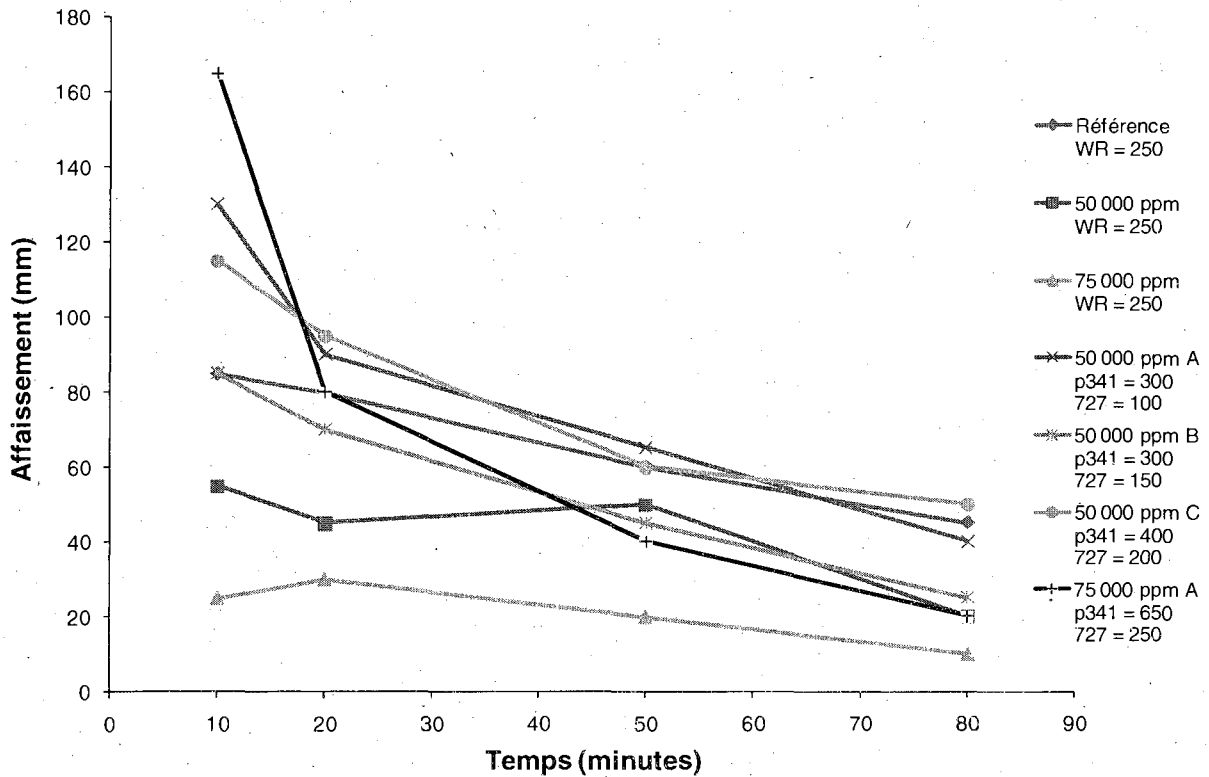


Figure 6.8 Variation de l'affaissement dans le temps - 30 MPa sans air entrainé

La référence sans eau recyclée présente quasi une droite, ce qui signifie que l'affaissement se maintient bien dans le temps. En ce qui concerne les références à 50 000 ppm et 75 000 ppm contenant uniquement du Eucon WR, les affaissements se maintiennent aussi dans le temps, mais demeurent toujours faibles. Il est d'ailleurs surprenant, pour le mélange 30 SAE 50, d'observer une légère augmentation de l'affaissement entre 20 et 50 minutes.

Enfin, les trois mélanges à 50 000 ppm contenant des doses semblables de Plastol 341 présentent des pertes d'affaissement relativement importantes dans le temps. En 70 minutes, le mélange 50 000 ppm A perd 90 mm, le mélange 50 000 ppm B perd 60 mm et le mélange adjuvanté C perd 75 mm. Tel qu'appréhendé, une brusque chute de l'affaissement est observable pour le mélange 30 SAE 75 A. Ces observations portent à croire que la maniabilité des bétons avec eau recyclée fabriqués avec du Plastol 341 ne se maintient pas facilement dans le temps.

6.1.1.4. 35 MPa avec air entrainé

Les figures 6.9 et 6.10 présentent les mélanges de 35 MPa avec air entraîné: Un béton de référence sans eau recyclée a été fabriqué, ainsi que cinq bétons dont l'adjuvantation a été modifiée (A à E). La figure 6.9 présente uniquement l'affaissement initial des bétons alors que la figure 6.10 présente la variation de l'affaissement de ces bétons dans le temps.

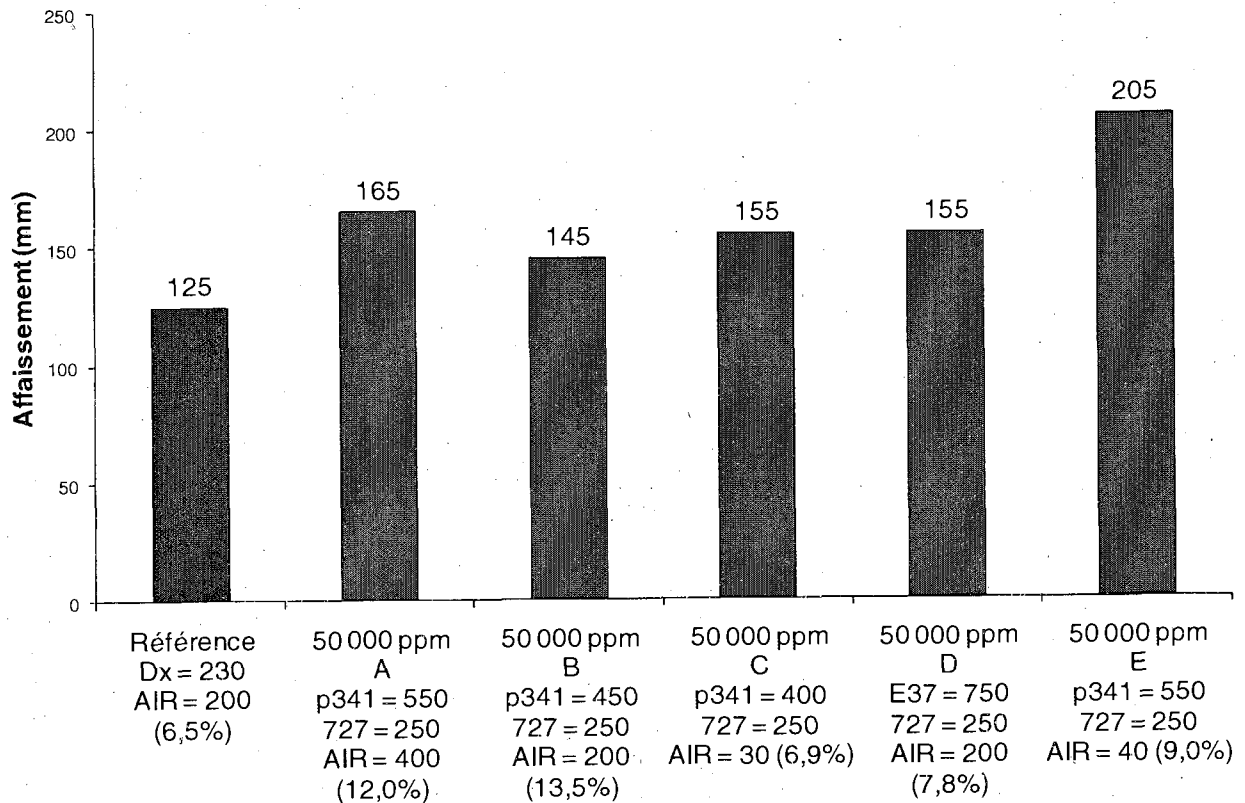


Figure 6.9 Affaissement à 10 minutes - 35 MPa avec air entrainé

Il n'est pas difficile d'obtenir un affaissement élevé à 10 minutes pour le mélange 35 MPa AE tel que démontré à la figure 6.9. Les superplastifiants, qu'il s'agisse du Plastol 341 ou du Eucon 37, augmentent significativement la maniabilité initiale. Les affaissements des mélanges 35 AE sont un peu plus élevés que ceux des autres mélanges. La référence, de même que tous les mélanges adjuvantés, présentent donc un affaissement initial approprié. Le mélange 50 000 ppm E présente par ailleurs un affaissement quelque peu élevé pour un béton régulier de 35 MPa.

Le problème de l'affaissement des bétons de cette série est présenté davantage à la figure 6.10 où l'évolution de l'affaissement est exprimée en fonction du temps. Le béton de référence présente la courbe la plus horizontale, mais l'affaissement de ce mélange chute malgré tout de 55 mm en 70 minutes.

Des pertes importantes sont observées, et ce davantage lorsque l'affaissement initial est très élevé. Les cinq mélanges adjuvés présentent une chute d'affaissement dans le temps, en moyenne de 115 mm. Le mélange 35 AE E présente la chute d'affaissement la plus importante (de 205 à 50 mm en 80 minutes pour le mélange adjuvé 5). Ces pertes d'affaissement sont en grande partie reliées au durcissement rapide des bétons contenant de l'eau recyclée, et la petitesse de la gâchée, soit 200 kg, peut également être une cause. Elles découlent aussi d'une perte du volume d'air de 2 à 5 % entre 10 et 80 minutes.

Suite aux essais réalisés en laboratoire, il semble difficile de confectionner des bétons de résistance nominale de 35 MPa ayant un affaissement stable dans le temps. Les essais en usine démontreront que ces pertes d'affaissement sont en partie attribuables au malaxage des bétons en laboratoire et à la plus grande finesse des particules en suspension dans l'eau recyclée conservée en laboratoire.

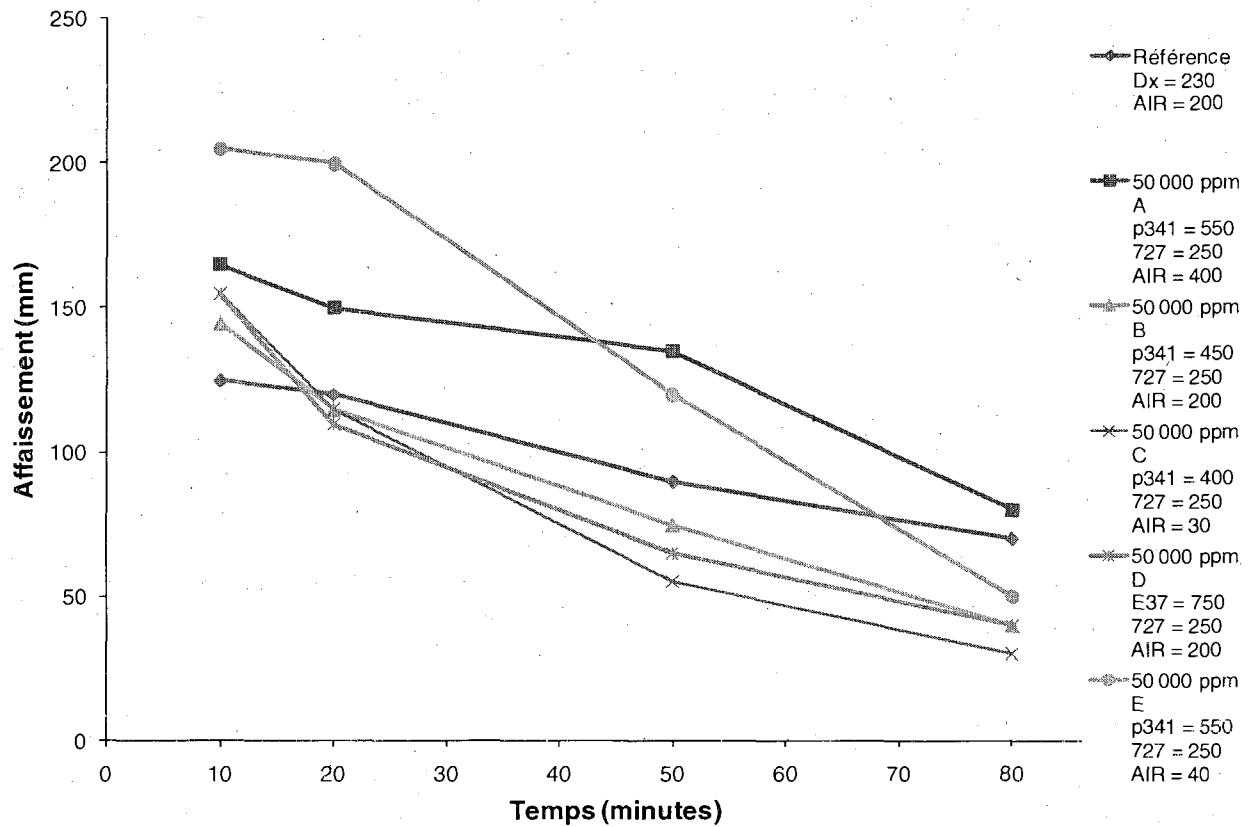


Figure 6.10 Variation de l'affaissement dans le temps - 35 MPa avec air entrainé

6.1.2. Teneur en air

Les figures 6.11 et 6.12 présentent l'évolution de la teneur en air des bétons 25 MPa avec air entrainé. La figure 6.11 présente les deux bétons de référence sans eau recyclée ainsi que des bétons avec une eau de gâchage à 50 000 ppm. La figure 6.12 présente les deux mêmes bétons de référence sans eau recyclée et des bétons fabriqués avec une eau de gâchage à 75 000 ppm.

6.1.2.1. 25 MPa avec air entraîné

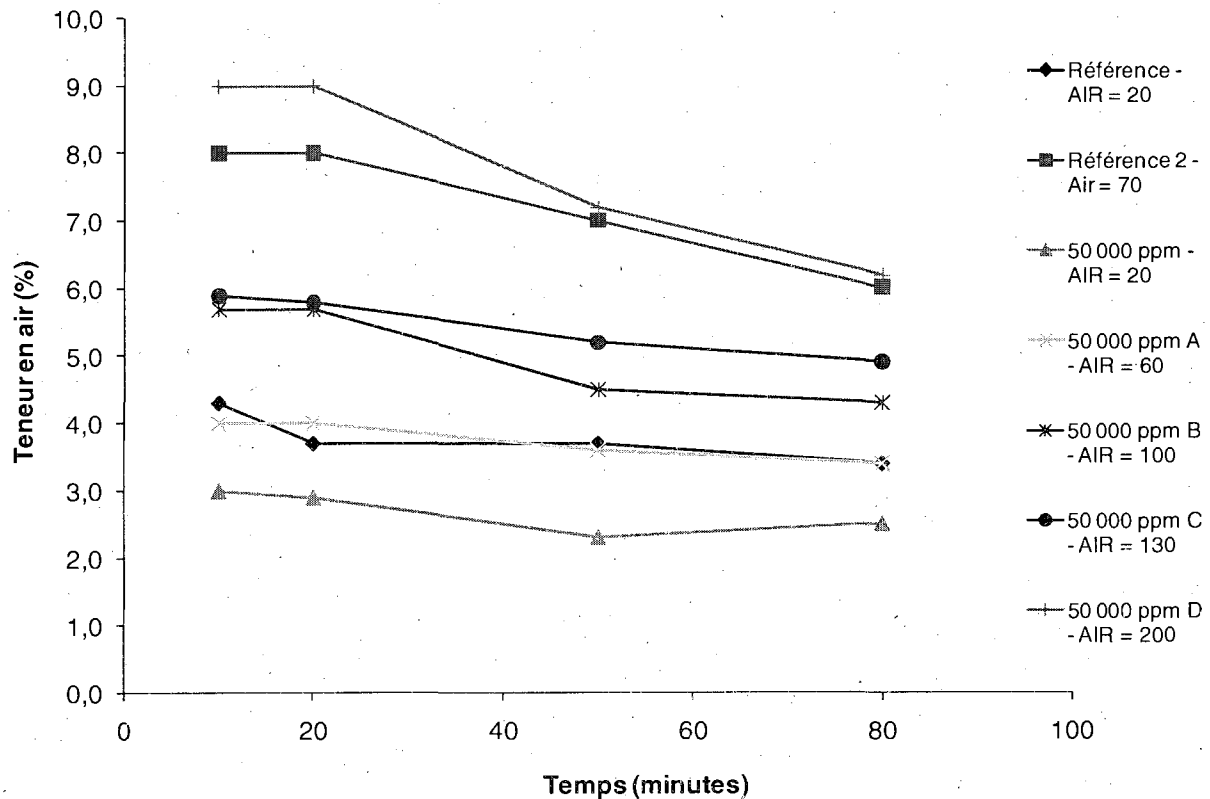


Figure 6.11 Évolution du volume d'air dans le temps - 25 MPa air entraîné, 50 000 ppm

Commune aux deux figures (6.11 et 6.12), la référence 2 à 0 ppm contient visiblement plus d'air que la majorité des mélanges. Il faut rappeler que cette seconde référence (8,0 % d'air) a été effectuée principalement car la première référence (4,3 % d'air) ne contenait pas suffisamment d'air. Comme la référence 1 ne contient pas suffisamment d'air et que la référence 2 en contient trop, l'objectif est de fabriquer des bétons avec eau recyclée dont le pourcentage d'air se situe entre les deux références.

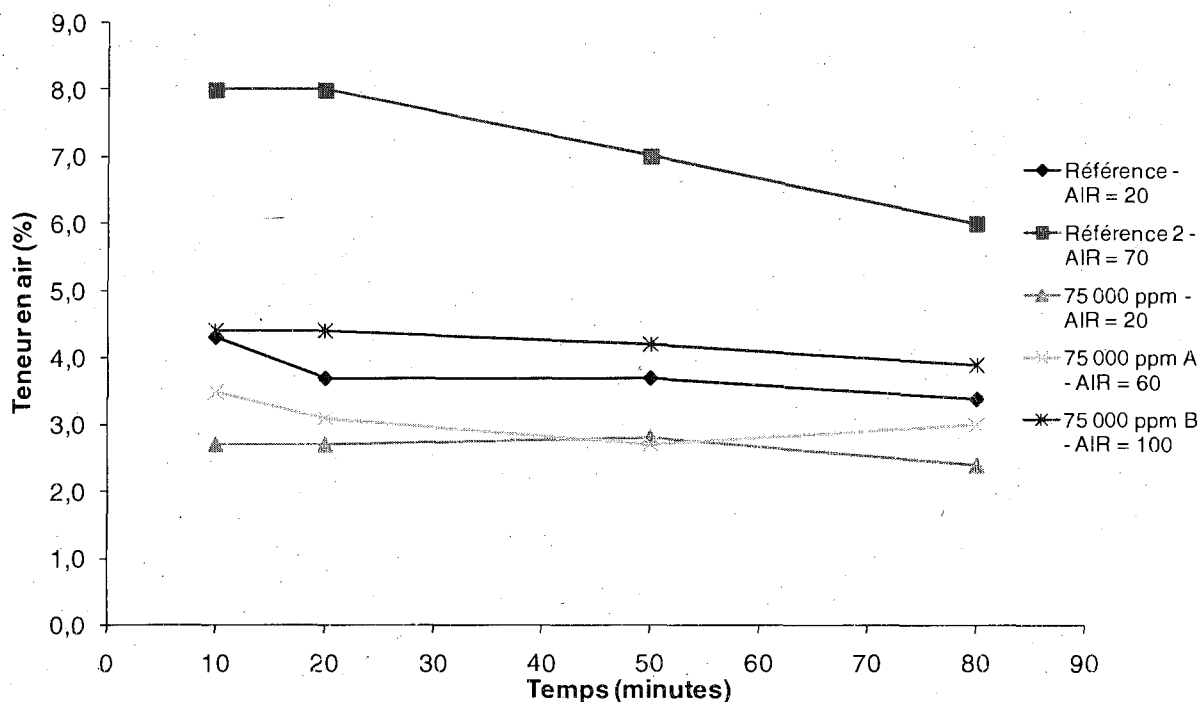


Figure 6.12 Évolution du volume d'air dans le temps - 25 MPa air entraîné, 75 000 ppm

Lorsque l'eau recyclée est ajoutée sans correctif sur la dose d'agent entraîneur d'air, une perte drastique du volume d'air semble inévitable. Le volume d'air lorsque l'eau est concentrée à 50 000 ppm est 3,0 % et il est de 2,7 % lorsque l'eau recyclée est à 75 000 ppm.

Pour rétablir le volume d'air tel qu'il était avant l'ajout d'eau recyclée, il est nécessaire d'ajouter des doses importantes d'agent entraîneur d'air. Les mélanges 50 000 ppm adjuvés 2, 3 et 4 contiennent un volume d'air suffisant, respectivement 5,7 %, 5,9 % et 9,0 %. Ils contiennent par ailleurs 5 à 10 fois la dose de la référence initiale, soit 100, 130 et 200 ml / 100 kg de ciment comparativement aux 20 ml / 100 kg incorporés dans la gâchée de référence. Ce pourcentage d'air se maintient plutôt bien dans le temps.

Le pourcentage d'air des bétons contenant de l'eau à 75 000 ppm est également très stable dans le temps. Par contre, aucun des mélanges ne respecte les objectifs initiaux, soit entre 5 % et 7 % d'air à 10 minutes. Le volume d'air des mélanges 25 AE 75 A et 25 AE 75 B est

toujours trop faible (3,5 % et 4,4 %). Il aurait probablement été possible d'entraîner suffisamment d'air en augmentant davantage la quantité d'Airextra incorporée au mélange, mais cela nécessitait une quantité très importante d'adjuvants pour un béton ayant 25 MPa de résistance. Il est rare, dans la pratique, d'incorporer des doses importantes d'adjuvants pour des bétons conventionnels de 25 MPa de résistance nominale.

6.1.2.2. 35 MPa avec air entraîné

Six bétons de 35 MPa avec air entraîné sont présentés à la figure 6.13. Il s'agit d'un béton de référence sans eau recyclée et de cinq bétons dont l'adjuvantation a été modifiée (A à E).

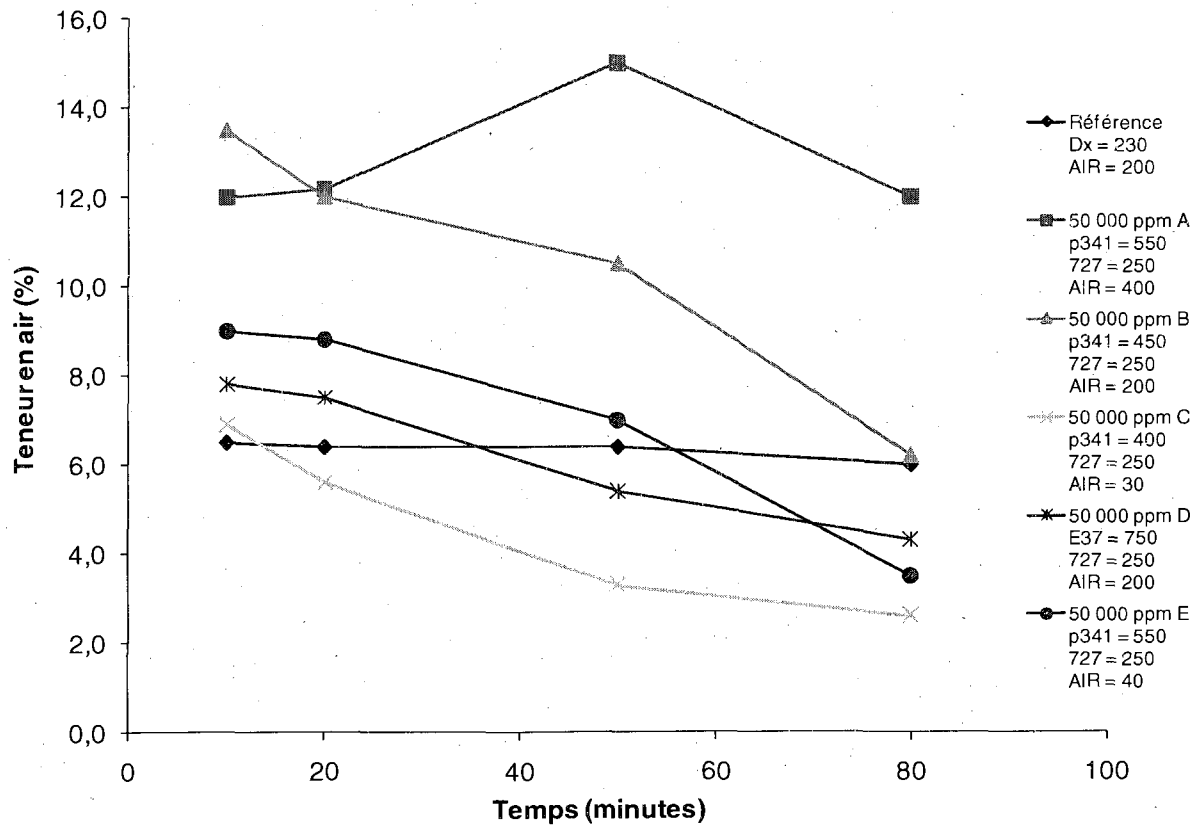


Figure 6.13 Évolution du volume d'air dans le temps - 35 MPa avec air entraîné

La variation du volume d'air varie beaucoup plus dans le temps pour les mélanges 35 MPa AE comme le démontre la figure 6.13. Premièrement, la référence sans eau recyclée présente un

volume d'air très stable dans le temps, soit débutant à 6,5 % à 10 minutes pour terminer à 6,0 % à 80 minutes.

Le second mélange le plus stable dans le temps est le 35 AE 50 D, qui contient de l'Eucon 37 mais ne contient pas de Plastol 341. Une diminution de 3,5 % du volume d'air a cependant été notée, soit 7,8 % à 10 minutes et 4,3 % à 80 minutes.

Il semble que l'ajout de Plastol 341 rende difficile le contrôle du volume d'air dans le temps, volume qui peut même augmenter (voir 35 AE 50 A). De plus, un béton ayant une teneur en air élevée initialement risque de connaître une diminution plus importante (de 13,5 % à 6,2 % pour le mélange 35 AE 50 C). En fait, l'hypothèse retenue est que l'utilisation du Plastol 341 entraîne un volume important d'air, mais qui pourrait être constitué de grosses bulles relativement instables dans le temps. Or, des doses élevées d'Airextra et de Plastol 341 engendrent des bétons contenant beaucoup trop d'air entraîné. À ce titre, il ne semble pas facile de maîtriser la stabilité du réseau de bulles d'air d'un béton de résistance nominale de 35 MPa en utilisant un superplastifiant à base de polycarboxylates (Plastol 341).

6.1.3. Température

La température des bétons varie entre 21 ° C et 29 ° C, toutes classes de résistances confondues. Elle varie principalement en fonction de la température ambiante du laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke, qui dépend surtout de la température extérieure. Les bétons réalisés lors des périodes de canicules en août 2007 (comme le 35 MPa AE) présentent une température plus élevée que les bétons fabriqués en mai (comme le 25 MPa SAE). Bien sûr, cet écart de température peut également être associé au fait que les mélanges 35 MPa AE contiennent une quantité plus importante de ciment, qui dégage de la chaleur lors des réactions d'hydratation (réaction exothermique). En effet, pour une même gâchée, la température tend à diminuer dans le temps, mais seulement de 1 ° C à 2 ° C, ce qui s'explique justement par le fait que le ciment s'hydrate rapidement au début et dégage donc plus de chaleur.

Quant à la température de l'eau recyclée, elle est généralement plus chaude (environ 2 à 3 ° C) que celle de l'eau potable. Cette chaleur supplémentaire provient de l'énergie de malaxage et du fait que les barils d'eau recyclée soient maintenus clos. Cependant, comme les deux eaux (recyclée et potable) sont mélangées avant d'être incorporées au béton, la température finale de l'eau de gâchage est adéquate.

Enfin, lorsque la température du béton est élevée, soit parce que la température ambiante ou l'eau incorporée sont plus chaudes que normalement, il se peut que le temps de prise soit légèrement plus court. Or, les données recueillies sur la température ne varient pas suffisamment pour en conclure que l'utilisation de l'eau recyclée engendre des variations importantes de température.

6.1.4. Stabilité du réseau de bulles d'air

6.1.4.1. 25 MPa avec air entraîné

Le tableau 6.1 présente les caractéristiques du réseau de bulles d'air de trois bétons de 25 MPa avec air entraîné. Le mélange sans eau recyclée, référence 2, ainsi que deux mélanges adjuvants (B et C) sont présentés. L'analyse de la stabilité du réseau de bulles d'air ne peut être effectuée sur tous les mélanges. Ces mélanges ont été sélectionnés puisqu'ils contiennent le pourcentage d'air le plus près des valeurs visées, soit entre 5 % et 7 % à 10 minutes.

Tableau 6.1 Réseau de bulles d'air -- 25 MPa avec air entraîné

| Mélange | 10 minutes | | | | 80 minutes | | | |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|
| | Air - béton frais (%) | Air - béton durci (%) | α (1/mm) | L bar (μ m) | Air - béton frais (%) | Air - béton durci (%) | α (1/mm) | L bar (μ m) |
| 25 AE 0 Réf. 2 | 8,0 | 5,4 | 23,7 | 182 | 6,0 | 4,5 | 25,8 | 190 |
| 25 AE 50 B | 5,7 | 4,0 | 21,6 | 233 | 4,3 | 2,8 | 24,3 | 270 |
| 25 AE 50 C | 5,9 | 4,5 | 25,2 | 201 | 4,9 | 2,9 | 26,0 | 233 |

6.1.4.2. 35 MPa avec air entraîné

Le tableau 6.2 présente les caractéristiques du réseau de bulles d'air de cinq bétons de 35 MPa avec air entraîné. En plus du béton de référence sans eau recyclée, le réseau de bulles d'air de quatre mélanges a été analysé.

Tableau 6.2 Réseau de bulles d'air — 35 MPa avec air entraîné (laboratoire)

| Mélange | 10 minutes | | | | 80 minutes | | | |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|
| | Air - béton frais (%) | Air - béton durci (%) | α (1/mm) | L bar (μm) | Air - béton frais (%) | Air - béton durci (%) | α (1/mm) | L bar (μm) |
| 35 AE 0 | 6,5 | 3,7 | 29,7 | 204 | 6,0 | 3,5 | 31,9 | 204 |
| 35 AE 50 B | 13,5 | 5,7 | 34,8 | 149 | 6,2 | 3,3 | 35,4 | 189 |
| 35 AE 50 C | 6,9 | 3,3 | 25,2 | 254 | 2,6 | 1,7 | 14,6 | 590 |
| 35 AE 50 D | 7,8 | 4,2 | 33,4 | 168 | 4,3 | 1,7 | 35,7 | 241 |
| 35 AE 50 E | 9,0 | 7,3 | 19,1 | 228 | 3,5 | 1,7 | 23,5 | 368 |

Premièrement, il existe un écart parfois important entre la teneur en air du béton frais et celle du béton durci. Cet écart est d'environ 1,5 % pour les bétons 25 MPa, jusqu'à 4 % pour les bétons 35 MPa. La précision des instruments de mesure peut être une cause, mais n'est probablement pas la principale. En effet, les lectures sur le béton durci se font à l'aide d'un microscope et sont réalisées par un technicien. Celui-ci doit alors juger si le vide observé correspond à une bulle d'air ou à un arrachement lors du polissage de l'échantillon. Cette différence n'est pas facile à distinguer, et il est possible que plusieurs bulles d'air aient été considérées comme un arrachement alors que ce n'était pas le cas.

En général, les teneurs en air mesurées sur le béton durci sont inférieures à celles mesurées dans le béton frais. L'écart normal est d'environ 1 % à 2 %. Il est difficile d'expliquer les écarts de près de 4 %, d'autant plus que les mesures sur le béton durci ont été faites par une technicienne possédant une très grande expérience.

La surface spécifique des bétons 25 MPa à air entraîné est comprise entre 21,6 et 26,0 mm⁻¹. Une surface spécifique supérieure à 25 mm⁻¹ est considérée comme excellente du point de vue de la protection contre le gel – dégel. Une surface spécifique élevée (> 25 mm⁻¹) indique que l'air entraîné est contenue dans des petites bulles qui offrent une meilleure protection contre les effets du gel. Dans le cas des bétons de la série 25 MPa avec air entraîné (tableau 6.1), certaines valeurs sont inférieures à 25 mm⁻¹ mais elles sont néanmoins toutes supérieures à 21,6 mm⁻¹. Quoiqu'un peu faibles, ces valeurs ne pénalisent pas significativement la durabilité au gel.

Les résultats du tableau 6.2 indiquent que les surfaces spécifiques des bétons de 35 MPa avec air entraîné sont comprises entre 19,1 et 35,7 mm⁻¹. Les bétons 35 AE 0, 35 AE 50 B et 35 AE 50 D ont tous des surfaces spécifiques stables dans le temps et bien supérieures à la limite de 25 mm⁻¹.

La surface spécifique du béton 35 AE 50 C subit une importante chute entre 10 et 80 minutes (25,2 à 14,6 mm⁻¹), ce qui révèle un problème d'instabilité du réseau de bulles d'air. Cette instabilité se manifeste notamment par une importante perte du volume d'air. Ce béton contient une très faible dose d'agent entraîneur d'air (30 ml / 100 kg). L'air initial est probablement produit par le superplastifiant, qui entraîne généralement de grosses bulles qui ne sont pas stables. Le cas du béton 35 AE 50 E est assez similaire. Ce béton contient lui aussi une faible dose d'agent entraîneur d'air. Un réseau de bulles d'air étrapé est facilité par le superplastifiant ce qui tend à produire un réseau de bulles d'air d'un plus grand diamètre et d'une surface spécifique plus faible.

Les résultats du tableau 6.1 indiquent que le facteur d'espacement des bétons de 25 MPa est globalement conforme et stable dans le temps. Une valeur seulement est significativement supérieure à la limite de 230 µm (25 AE 50 B à 80 minutes : 270 µm). Cette valeur n'est toutefois pas critique car elle résulte de l'entraînement d'un volume d'air trop faible (2,8% à 80 minutes). Pour corriger cette non-conformité, il suffirait d'augmenter la dose d'agent entraîneur d'air.

Le tableau 6.2 présente le facteur d'espacement (L bar) des bétons de 35 MPa. À 10 minutes, les bétons de cette série possèdent un facteur d'espacement conforme. Seul le mélange de béton 35 AE 50 C (254 μm) possède un facteur d'espacement très légèrement supérieur à la limite de 230 μm . Les facteurs d'espacement des bétons 35 AE 0, 35 AE 50 B et 35 AE 50 D sont globalement conformes et stables dans le temps. Les bétons 35 AE 50 B et 35 AE 50 D ont été produits avec une forte dose d'agent entraîneur d'air (200 ml / 100 kg). Ce fort dosage tend à produire un réseau de bulles d'air très stable. Les bétons 35 AE 50 C et 35 AE 50 E possèdent un facteur d'espacement à 80 minutes très supérieur à la limite de 230 μm . Ces facteurs d'espacement non conformes résultent d'un réseau de bulles d'air instable. Cette instabilité découle probablement du faible dosage de l'agent entraîneur d'air (≤ 40 ml / 100 kg). L'air est principalement produit par le superplastifiant qui a tendance à produire de grosses bulles instables.

6.1.5. Temps de prise

6.1.5.1. 25 MPa sans air entraîné

La figure 6.14 présente le temps de prise initial de tous les bétons de 25 MPa sans air entraîné fabriqués en laboratoire.

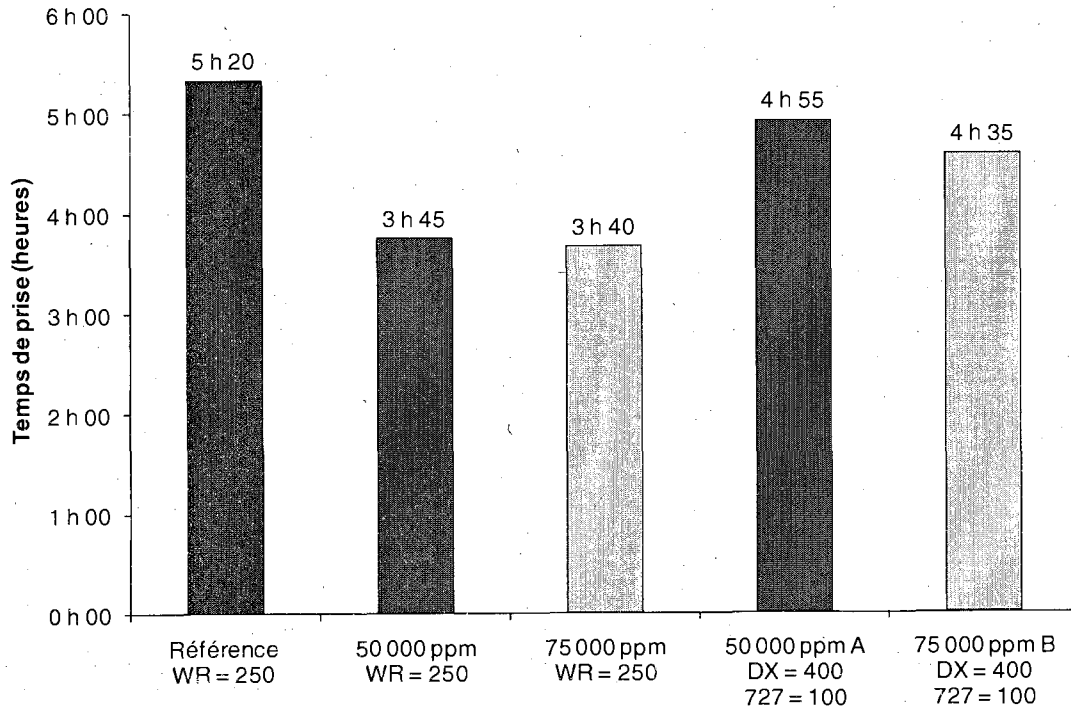


Figure 6.14 Temps de prise initial - 25 MPa sans air entrainé.

La figure 6.14 démontre bien les effets de l'eau recyclée sur le temps de prise du béton. Le temps de prise de la référence à 0 ppm est adéquat. À noter que le temps de prise est toujours plus rapide pour les bétons de laboratoire que pour les bétons produits en usine. Lorsque de l'eau recyclée est ajoutée, le temps de prise est plus rapide d'environ une heure, voire une heure trente pour le 25 MPa SAE. Par ailleurs, l'ajout d'un retardateur de prise, l'Eucon 727, permet de retarder la prise du béton assez facilement. Pour ce mélange, la dose est d'ailleurs plutôt faible. Le temps de prise du mélange 25 MPa SAE ne présente donc pas de problème majeur lorsqu'un retardateur de prise est utilisé.

6.1.5.2. 25 MPa avec air entraîné

La figure 6.15 présente le temps de prise initial des bétons de 25 MPa avec air entraîné, fabriqués avec de l'eau de gâchage à 50 000 ppm. À noter que les deux bétons de référence ne contiennent cependant pas d'eau recyclée.

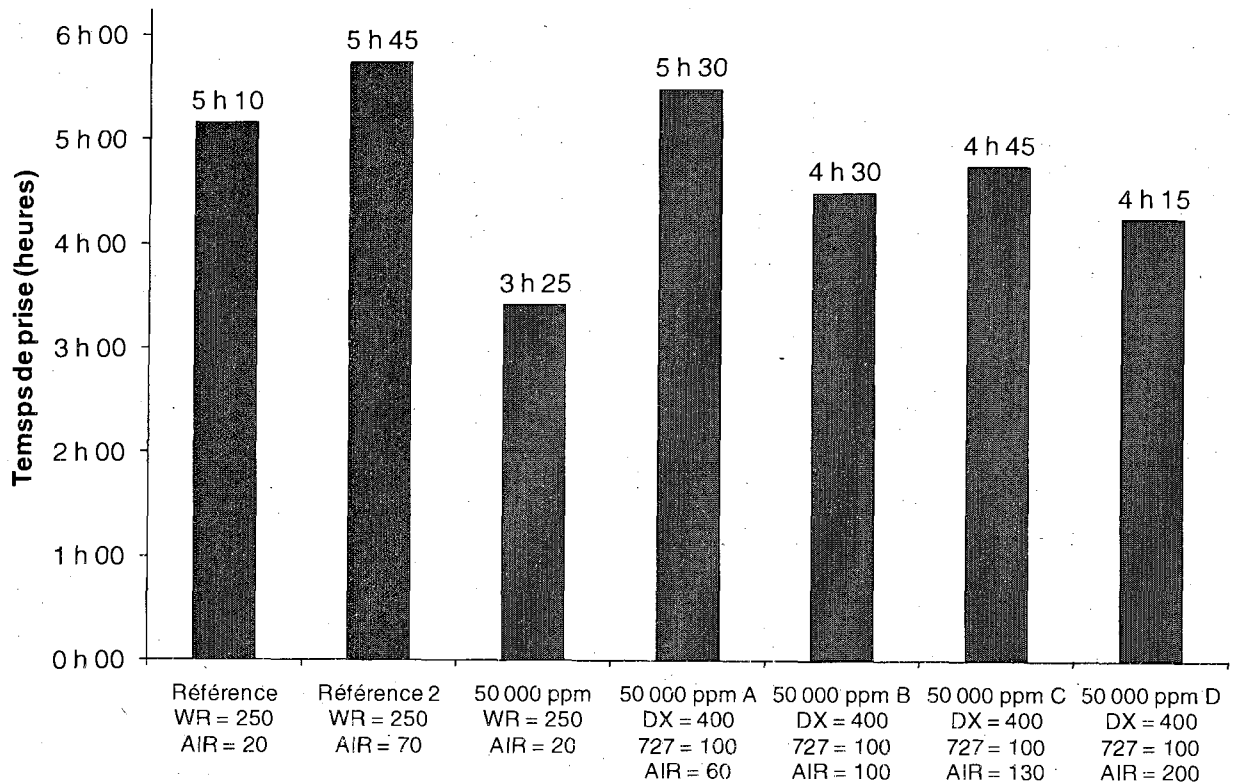


Figure 6.15 Temps de prise initial - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm

Pour le mélange 25 MPa AE, présenté à la figure 6.15, l'effet de la diminution du temps de prise est encore une fois très marqué. Il s'agit de 5 h 10 et 5 h 45 pour les références comparativement à 3 h 25 pour le mélange 50 000 ppm sans modification des adjuvants. Par la suite, les différents mélanges contiennent tous 100 ml de 727, mais même avec une même dose de retardateur le temps de prise peut varier de 1 h 15 (minimum de 4 h 15 et maximum de 5 h 30). Il est à noter que l'affaissement et la teneur en air influencent aussi le temps de prise, et l'incertitude de l'essai pour déterminer le temps de prise est d'environ 20 minutes. Malgré tout, pour les mélanges dont le temps de prise demeure rapide (25 AE 50 B et 25 AE 50 D), la dose de retardateur aurait pu être augmentée de 50 ml / 100 kg de ciment.

La figure 6.16 présente le temps de prise initial des bétons de 25 MPa avec air entraîné, fabriqués avec de l'eau de gâchage à 75 000 ppm. Tout comme pour la figure 6.15, il est à noter que les deux bétons de référence ne contiennent cependant pas d'eau recyclée.

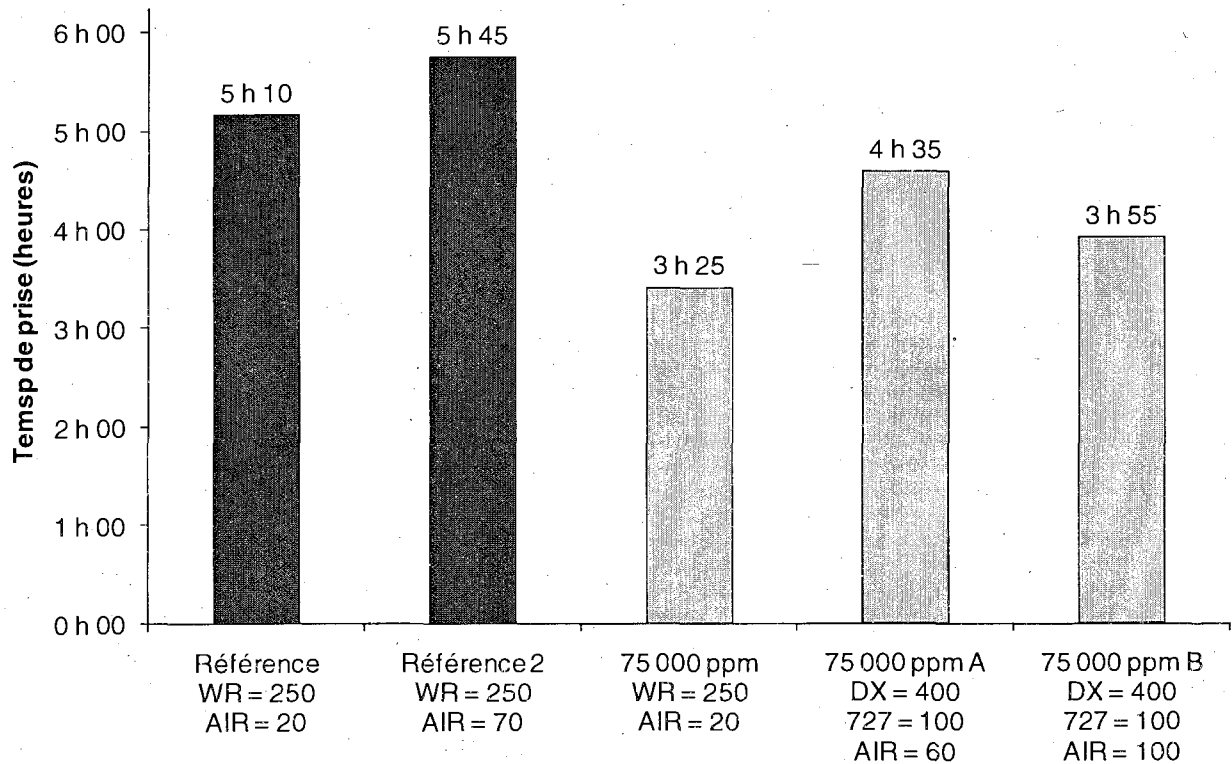


Figure 6.16 Temps de prise initial - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm

Dans le cas des mélanges 25 MPa AE avec de l'eau concentrée à 75 000 ppm, le temps de prise est particulièrement court tel que présenté à la figure 6.16. Le béton 25 AE 75 ne contenant aucun retardateur de prise a un temps de prise de 3 h 25, ce qui est très court, mais peu surprenant. Les deux mélanges adjuvantés (25 AE 75 A et 25 AE 75 B) ont également un temps de prise trop court. La même conclusion que pour les mélanges 25 MPa AE concentrés à 50 000 ppm s'applique, c'est-à-dire que la dose d'Eucon 727 aurait dû être augmentée.

Les observations quant au temps de prise des bétons avec air entraîné et contenant de l'eau recyclée montrent que le temps de prise des bétons avec eau recyclée est généralement plus court que les bétons sans eau recyclée. L'ajout de retardateur de prise (727) permet d'allonger le temps de prise d'environ 1 heure, sans compenser complètement les effets de l'eau recyclée pour les bétons fabriqués en laboratoire.

6.1.5.3. 30 MPa sans air entraîné

Le temps de prise initial de tous les bétons de 30 MPa sans air entraîné est présenté à la figure 6.17. Les trois premières bandes présentent les bétons ayant tous la même adjuvantation mais de l'eau à différentes concentrations (Référence, 50 000 et 75 000 ppm). Par la suite, trois mélanges contenant une eau de gâchage à 50 000 ppm sont présentés ainsi qu'un mélange contenant de l'eau de gâchage à 75 000 ppm.

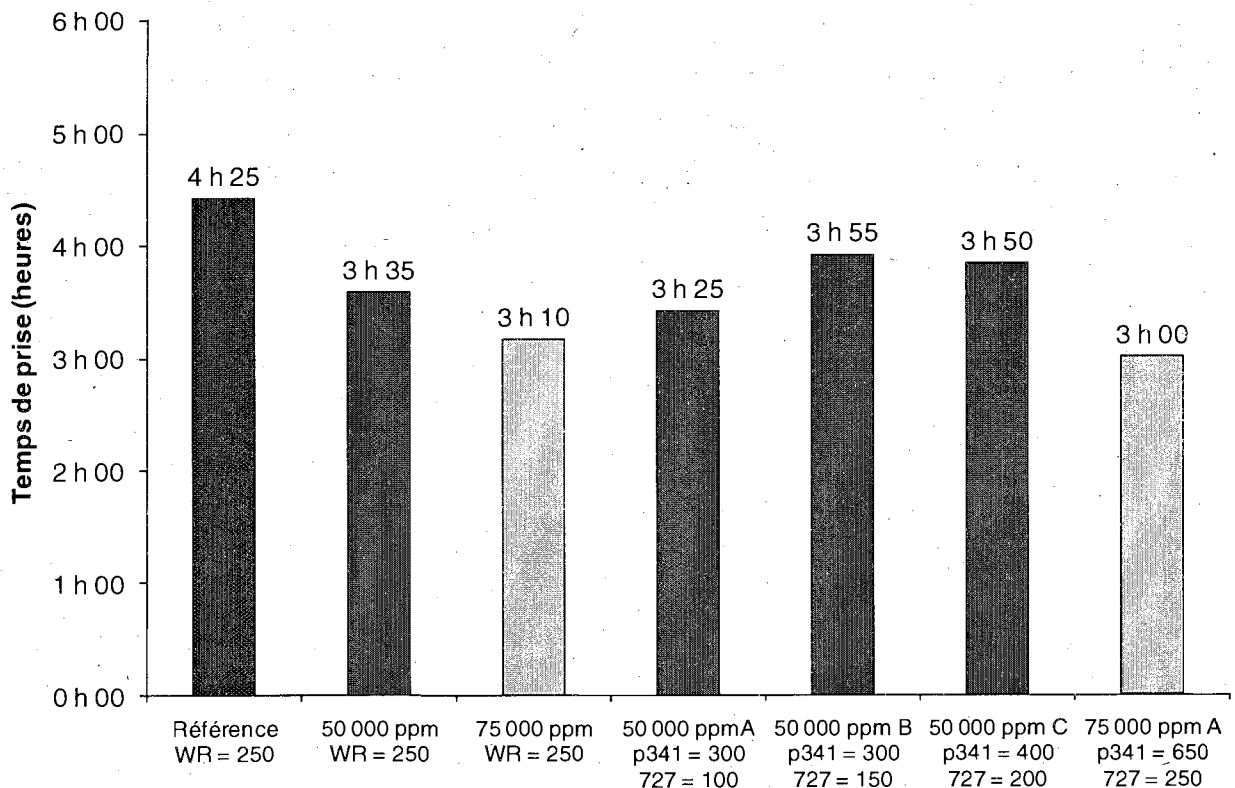


Figure 6.17 Temps de prise initial - 30 MPa sans air entraîné

Le mélange 30 MPa SAE (figure 6.17) présente le temps de prise le plus difficile à ajuster. Initialement, le temps de prise de la référence sans eau recyclée est plutôt court (4 h 25). Les bétons 30 MPa ont été effectués durant les journées chaudes d'été, ce qui explique en partie la prise si rapide. Tel qu'attendu, les références sans adjuvant à 50 000 et 75 000 ppm présentent un temps de prise plus court d'environ une heure (3 h 35 et 3 h 10). Par la suite, tous les mélanges ont un temps de prise très court. Il est surprenant d'observer un temps de prise quasi identique entre les mélanges 50 000 ppm B et C, alors que la dose de retardateur a été

augmentée de 50 ml / 100 kg de ciment. Il n'est pas exclu que le retardateur n'ait plus d'effet après une certaine dose.

Par ailleurs, avec de l'eau à 75 000 ppm, malgré l'ajout de 250 ml / 100 kg de ciment de retardateur, la prise est trop rapide. Cette donnée peut sembler incohérente puisque le temps de prise n'a pas augmenté malgré l'ajout du retardateur de prise. Cependant, la référence est fabriquée avec du Eucon WR, adjuvant à base de lignine, alors que le béton 75 000 ppm A est fabriqué avec du Plastol 341, soit un polycarboxylate. La différence entre l'utilisation de ces deux adjuvants peut être responsable de la faible variation du temps de prise malgré l'ajout de l'agent retardateur.

6.1.5.4. 35 MPa avec air entrainé

La figure 6.18 présente le temps de prise initial des bétons de 35 MPa avec air entraîné. La référence, sans eau recyclée, est présentée ainsi que les cinq mélanges dont l'adjuvantation a été modifiée.

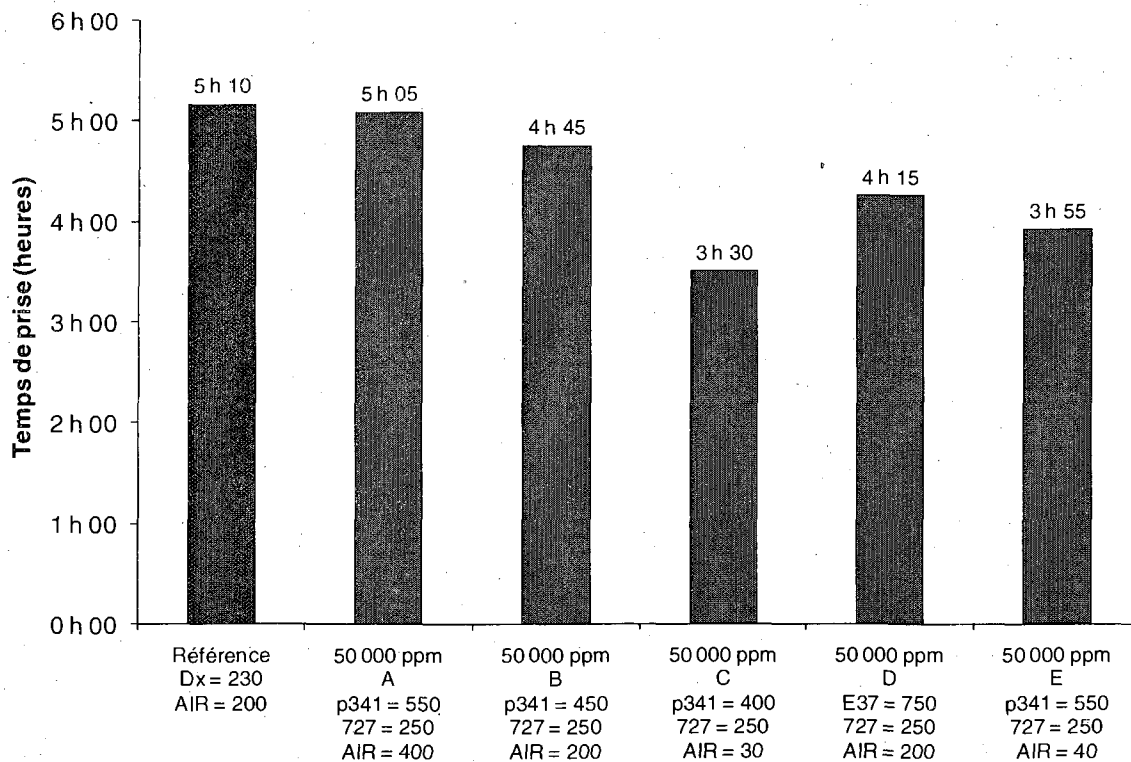


Figure 6.18 Temps de prise initial - 35 MPa avec air entraîné

Contrairement au mélange 30 MPa SAE, le temps de prise du mélange 35 MPa AE n'est pas vraiment problématique (figure 6.18). Le temps de prise de la référence sans eau recyclée est adéquat pour du béton de laboratoire.

Les mélanges 35 AE 50 A et 35 AE 50 B présentent un temps de prise quasi identique à celui de la référence. Le mélange 35 AE C présente cependant un temps de prise plus rapide. Cela s'explique par le fait que sa teneur en air est inférieure aux autres mélanges (6,9 %) et que sa résistance est particulièrement élevée (43 MPa à 28 jours plutôt que 35 MPa). L'affaissement, bien que de 155 mm à 10 minutes, est de 30 mm à 80 minutes. Ce béton a donc développé beaucoup plus de résistance et plus rapidement que les autres mélanges. Quant aux deux derniers mélanges, 35 AE 50 D et 35 AE 50 E, le temps de prise est encore un peu rapide. La dose de retardateur semble cependant suffisamment élevée, soit 250 ml / 100 kg de ciment. Comme la teneur en air de ces mélanges est plus faible, le développement de la résistance est plus rapide puisqu'il y a moins de bulles d'air dans la pâte de béton.

6.1.6. Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais en laboratoire

L'utilisation de l'eau recyclée engendre une perte d'affaissement très significative (pouvant aller jusqu'à xx %) pour tous les types de bétons testés. Cet effet avait déjà été constaté suite aux travaux de Blanchard [2008]. La perte d'affaissement résulte de l'apport de particules très fines en suspension qui augmente la demande en eau. Cette perte est plus marquée avec les eaux recyclées à 75 000 ppm. Dans le cas des bétons de 25 MPa, il est possible de compenser en partie la perte d'affaissement en augmentant de 50 % le dosage en réducteur lorsque l'eau est concentrée à 50 000 ppm. Dans le cas d'une eau recyclée à 75 000 ppm, l'augmentation du dosage en réducteur d'eau n'est pas suffisante. Un superplastifiant devrait être utilisé pour rétablir complètement la perte d'affaissement. Dans le cas des bétons de 30 et 35 MPa, l'eau recyclée à 50 000 ppm engendre des pertes d'affaissement encore plus prononcées. L'augmentation de 50 % du dosage en réducteur d'eau permet de compenser la majeure partie des pertes d'affaissement du béton de 30 MPa. Dans le cas du béton de 35 MPa, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant. Dans le cas d'une eau recyclée à 75 000 ppm, il est

possible de rétablir l'affaissement d'un béton de 30 MPa, mais seulement en utilisant un superplastifiant. Les résultats de laboratoire ont montré qu'il serait très difficile de compenser les pertes d'affaissement d'un béton de 35 MPa avec air entraîné produit avec une eau recyclée à 75 000 ppm.

Les résultats en laboratoire ont montré que les pertes d'affaissement dues à l'eau recyclée résultent aussi de la diminution du volume d'air entraîné en présence d'eau recyclée. L'utilisation d'eau recyclée engendre systématiquement une diminution du volume d'air initial à 10 minutes. Cet effet a aussi été constaté à la suite des travaux de Blanchard [Blanchard 2008]. La perte d'air est plus importante lorsque la concentration en solide dans l'eau recyclée augmente (50 000 ppm vs 75 000 ppm). Dans le cas des bétons de 25 MPa et d'une eau recyclée à 50 000 ppm, il peut être nécessaire de multiplier par 5 le dosage de l'agent entraîneur d'air. Pour une eau recyclée à 75 000 ppm, un dosage 5 fois supérieur n'a pas permis d'obtenir une teneur en air initiale supérieure à 4,5 %.

L'ajustement du dosage de l'agent entraîneur d'air dans les bétons de 35 MPa s'est avéré très complexe. Cette complexité découle de l'interaction entre le superplastifiant (Plastol 341) et l'agent entraîneur d'air. L'utilisation de polycarboxylate (Plastol 341) en tant que réducteur d'eau demande un contrôle plus serré face à l'entraînement d'air que l'utilisation des réducteurs d'eau à base de lignine (Eucon WR) ou d'acide hydrocarboxyliques (Eucon Dx). L'utilisation du Plastol 341 nécessite également un contrôle plus serré des paramètres du mélange que lorsqu'un superplastifiant à base de naphthalène (Eucon 37) est choisi. L'ajout de superplastifiant pour compenser la perte d'affaissement a pour effet d'augmenter l'entraînement d'air. Pour obtenir le volume désiré, il faut alors diminuer le dosage de l'agent entraîneur d'air. Il en résulte un réseau de bulles d'air instable dans le temps et un facteur d'espacement non conforme à 80 minutes. L'utilisation d'un superplastifiant à base de naphthalène sulfonate (Eucon 37) ne produit pas ce type d'interaction, ce qui facilite grandement le processus d'optimisation des dosages des adjuvants.

Le temps de prise d'un béton avec eau recyclée est systématiquement plus faible. Globalement, une eau à 75 000 ppm diminue plus fortement le temps de prise qu'une eau à

50 000 ppm. Dans le cas d'un béton de 25 MPa, il est possible de compenser les effets de l'eau recyclée sur le temps de prise en augmentant de 50 % le dosage en réducteur d'eau et en utilisant un retardateur de prise. Il n'a pas été possible de rétablir complètement le temps de prise en présence d'une eau recyclée à 75 000 ppm. Pour les bétons de 30 MPa, l'utilisation d'un retardateur de prise permet de diminuer les effets de l'eau recyclée sur le temps de prise. Cependant, même avec un retardateur, le temps de prise demeure plus court d'environ 30 minutes (50 000 ppm). Pour les bétons de 35 MPa, il n'est pas possible d'annuler complètement les effets de l'eau recyclée sur le temps de prise. Malgré l'utilisation d'un retardateur de prise, le temps de prise des bétons avec eau recyclée est plus court d'environ 1 heure.

6.2. Propriétés du béton durci en laboratoire

6.2.1. Résistance à la compression

6.2.1.1. 25 MPa sans air entrainé

La résistance à la compression des bétons de 25 MPa sans air entrainé est présentée à la figure 6.19. Des essais de résistance ont été effectués à 1, 7 et 28 jours.

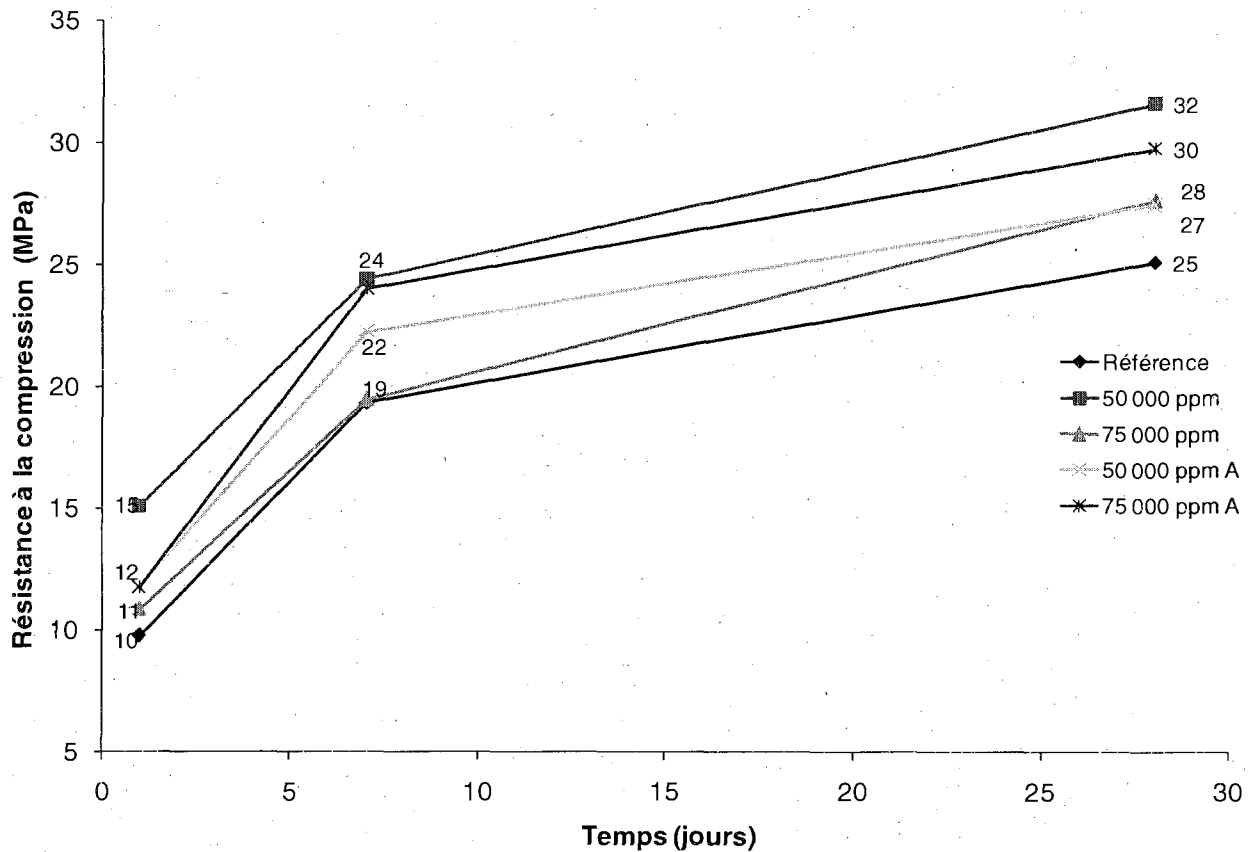


Figure 6.19 Résistance à la compression - 25 MPa sans air entrainé

Tout d'abord, la résistance nominale à 28 jours de ce mélange doit être de 25 MPa, ce qui est exactement le cas pour la référence sans eau recyclée. Une légère diminution du rapport E/C aurait pu assurer une résistance supérieure à 25 MPa, qui est tout juste la limite acceptable. L'ajout d'eau recyclée (25 SAE 50 et 25 SAE 75) démontre une augmentation de la résistance à la compression à un jour et à 28 jours, et cette augmentation est encore plus marquée lorsque l'eau de gâchage a une concentration de 50 000 ppm. Puisque le rapport E/C n'a pas été diminué, il est normal de ne pas observer de pertes de résistance. D'ailleurs, le rapport E/C effectif est toujours plus élevé que le rapport E/C réel, ce qui justifie toujours l'augmentation de la résistance à la compression. Les gains de résistance peuvent découler de l'effet « filler » et de l'effet nucléation engendré par les très fines particules en suspension dans l'eau recyclée. Ils peuvent aussi résulter de l'accélération de l'hydratation au jeune âge due à la présence d'alcalins dans l'eau recyclée.

L'augmentation de la résistance à toutes les échéances (1, 7 et 28 jours) est également observée pour les bétons contenant une modification de l'adjuvantation (25 SAE 50 A et 25 SAE 75 A). À noter qu'aucun des adjuvants utilisés n'a pour but de modifier la résistance à la compression.

6.2.1.2. 25 MPa avec air entraîné

La figure 6.20 présente la résistance à la compression des bétons de 25 MPa avec air entraîné contenant de l'eau de gâchage à 50 000 ppm. Les deux références ne contiennent cependant pas d'eau recyclée. Des essais de résistance ont été effectués à 1, 7 et 28 jours.

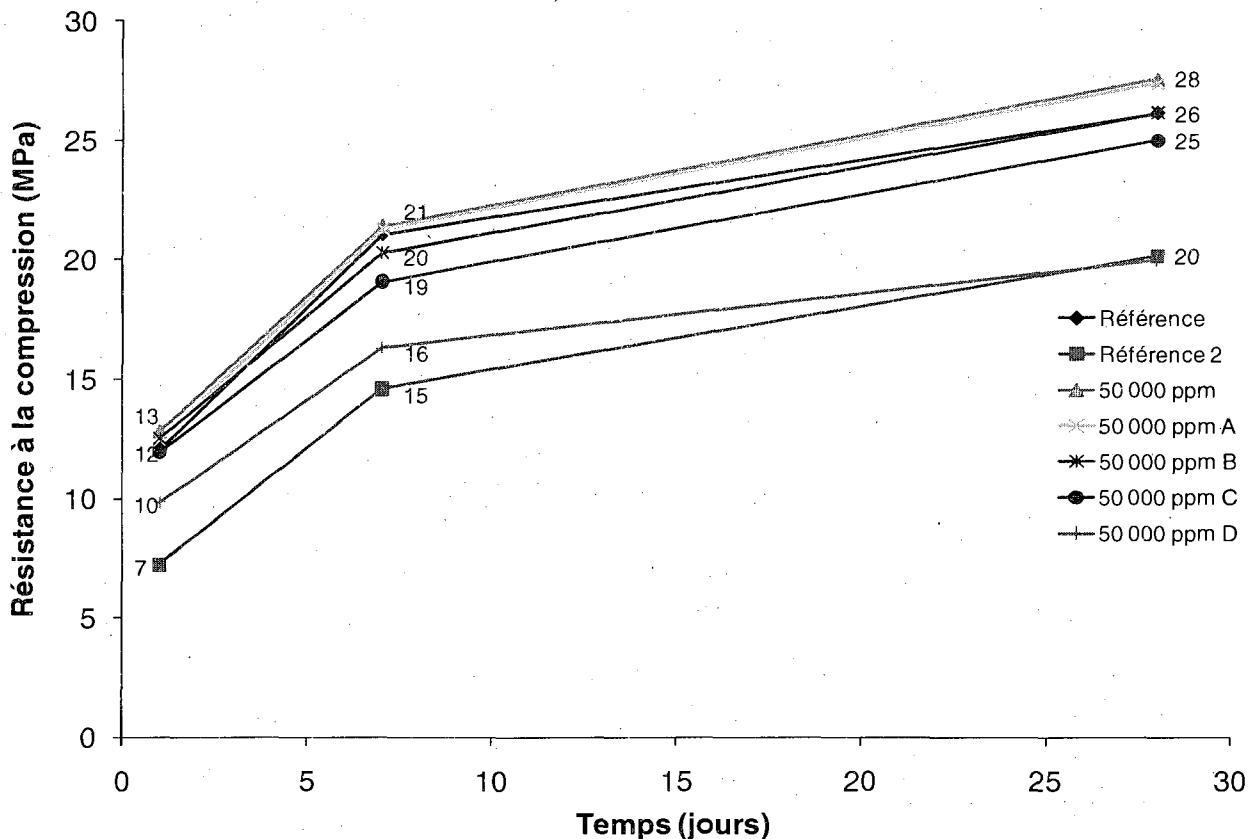


Figure 6.20 Résistance à la compression - 25 MPa avec air entraîné, 50 000 ppm

La première référence ne présente aucune anomalie et atteint 26 MPa à 28 jours. Par contre, la seconde référence (25 AE 0 réf. 2) possède des résistances très basses et ce même à 1 jour. La teneur en air de 8,0 % est élevée à 20 minutes (lors de la prise des éprouvettes pour les essais

de compression), ce qui explique principalement cette baisse de résistance. Bien que le rapport E/C soit constant, soit 0,64, l'affaissement initial de cette seconde référence est également élevé (175 mm).

Pour des bétons ayant la même teneur en air, l'ajout d'eau recyclée semble augmenter les résistances initiales. Ceci est probablement attribuable à l'accélération du temps de prise occasionné par l'utilisation de cette eau. Cependant, cette augmentation de résistance semble s'estomper avec le temps car la résistance en compression à 28 jours des bétons ayant des teneurs en air similaires sont pratiquement identiques.

L'ajout d'eau recyclée sans modification de l'adjuvantation permet d'accroître la résistance à toutes les échéances, tel que démontré par la courbe 25 AE 50 de la figure 6.20. La résistance à 28 jours est alors de 28 MPa.

Finalement, la modification de l'adjuvantation a peu d'effet sur la résistance à la compression, à l'exception du mélange 25 AE 50 D. Encore une fois, un volume d'air trop élevé (9,0 %) explique cette perte significative de résistance.

La figure 6.21 présente la résistance à la compression des bétons de 25 MPa avec air entraîné contenant de l'eau de gâchage à 75 000 ppm. Tout comme pour la figure 6.20, les deux bétons de référence ne contiennent pas d'eau recyclée. Des essais de résistance ont été effectués à 1, 7 et 28 jours à l'exception du mélange 75 000 ppm A où la résistance à 7 jours n'a pu être évaluée.

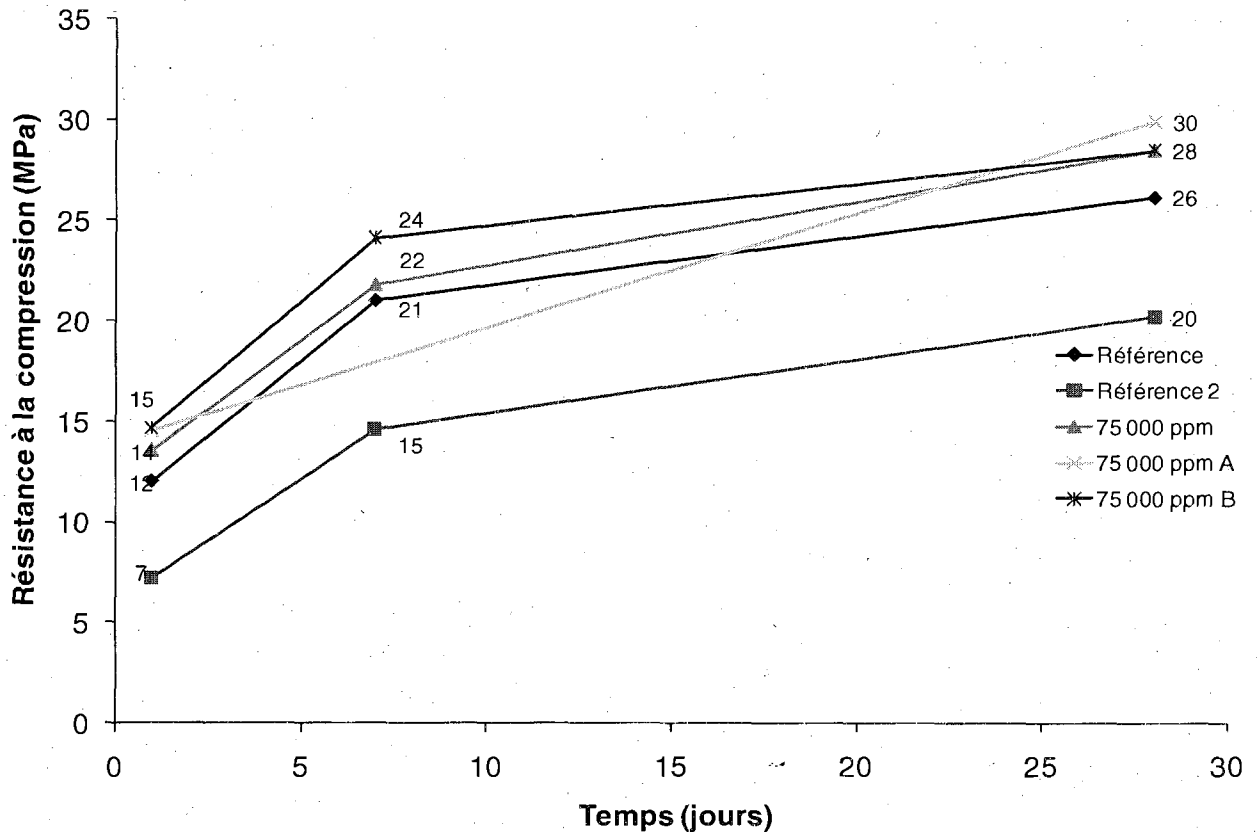


Figure 6.21 Résistance à la compression - 25 MPa avec air entraîné, 75 000 ppm

Le mélange avec de l'eau de gâchage à 75 000 ppm sans modification de l'adjuvantation (25 AE 75) confirme à nouveau les gains de résistances découlant de l'utilisation de l'eau recyclée. Ces gains sont encore plus marqués pour les mélanges dont l'adjuvantation est modifiée, notamment le 25 AE 75 A. Or, bien que la résistance à 28 jours de ce mélange soit très élevée, elle découle d'un manque d'entraînement d'air, soit 3,1 % à 20 minutes. Ceci aura des effets très négatifs sur la durabilité de ce béton face aux cycles de gel – dégel.

Les résistances à la compression des bétons 30 MPa SAE sont présentées à la figure 6.22. Le rapport E/C de 0,65 est légèrement élevé pour un mélange visant une résistance nominale de 30 MPa à 28 jours. La référence sans eau recyclée a testé 30 MPa à 28 jours.

6.2.1.3. 30 MPa sans air entraîné

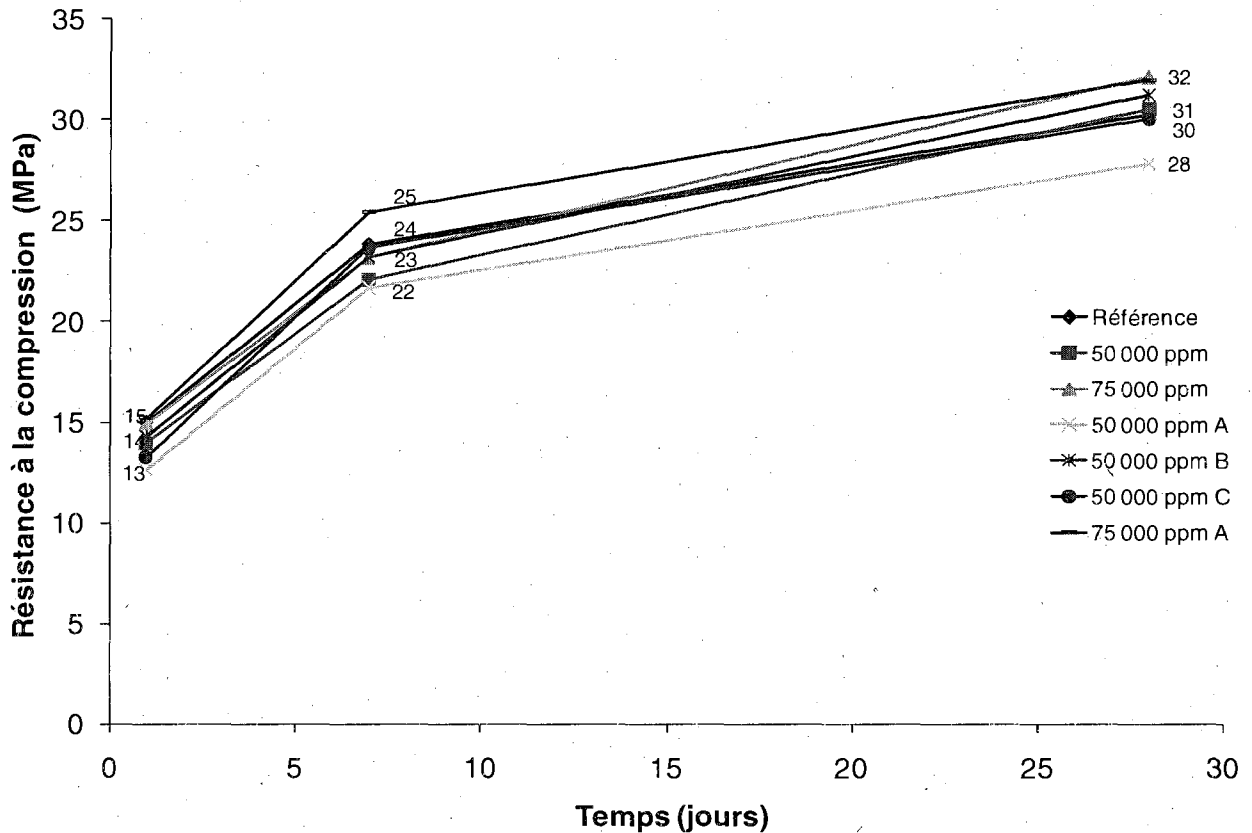


Figure 6.22 Résistance à la compression - 30 MPa sans air entraîné

Des gains de 1 à 2 MPa ont été observés pour les bétons avec eau recyclée à 50 000 ppm et 75 000 ppm et dont l'adjuvantation est identique au mélange de référence. Ces gains sont également attribuables en grande partie à l'effet « filler » des fines particules.

Lorsque différents adjuvants ont été utilisés, la résistance à 28 jours est demeurée en moyenne à 30 MPa. Seul le mélange 50 000 ppm A a obtenu 28 MPa à 28 jours, ce qui est en dessous de la valeur désirée. Cet écart minime est fort probablement relié à l'affaissement de ce mélange qui est quelque peu supérieur à celui des autres mélanges 30 MPa. Les résistances les plus élevées sont observées sur le mélange 75 000 ppm adjuvanté, et ce à un, sept et 28 jours. Le mélange 25 AE 75 B ne présente aucun problème de résistances à la compression.

La figure 6.23 présente les courbes de résistance à la compression des bétons 35 MPa AE. Comparativement aux trois dernières figures présentées, les courbes sont beaucoup moins rapprochées.

6.2.1.4. 35 MPa avec air entrainé

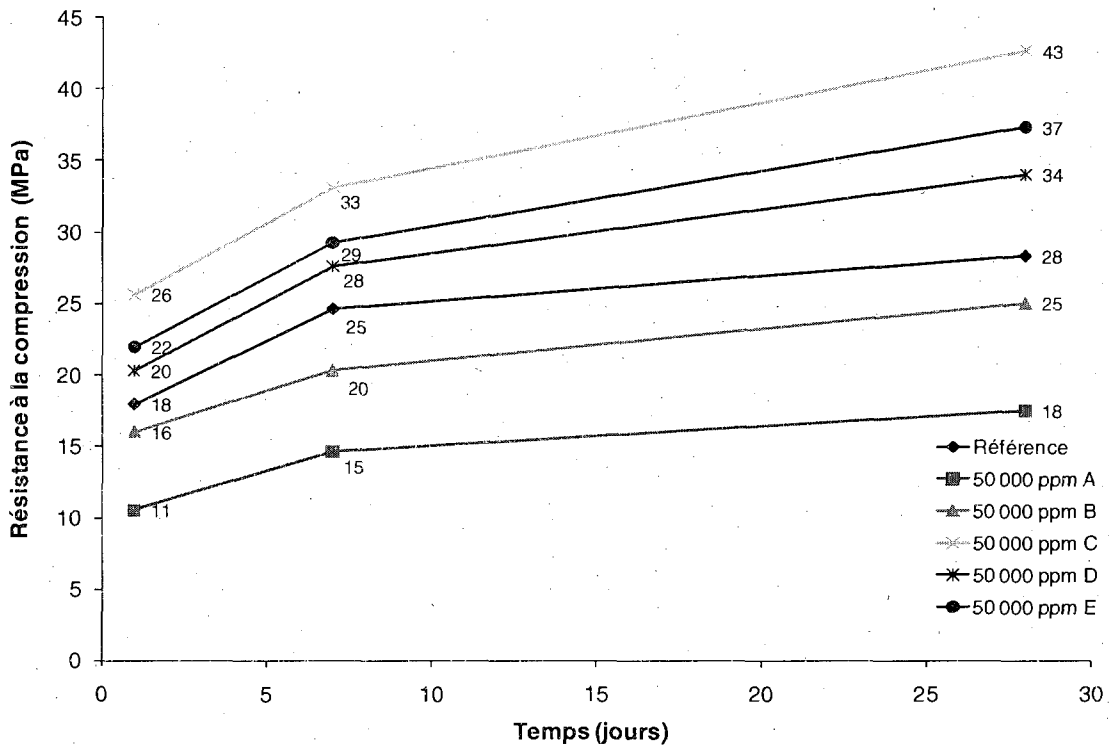


Figure 6.23 Résistance à la compression - 35 MPa avec air entrainé

En débutant l'analyse par la référence sans eau recyclée, il est possible de constater qu'à 28 jours la résistance atteinte (28 MPa) est de beaucoup inférieure à 35 MPa. Or, aucune source d'erreur ne semble justifier cet écart pourtant marqué. Cette valeur est donc considérée comme aberrante et non représentative de la résistance réelle à 28 jours d'un mélange 35 MPa, de rapport E/C égal à 0,45 et sans eau recyclée. D'ailleurs, pour ce même mélange, les résistances à un jour (18 MPa) et à sept jours (25 MPa) sont adéquates. Les résistances au jeune âge normales suggèrent que la faible résistance à 28 jours semble découler d'une erreur de manipulation ou de lecture de la presse lors de l'essai. Normalement, la résistance à sept jours équivaut environ à 75 % de la résistance à 28 jours. En suivant cette règle approximative, les échantillons du béton de référence auraient du avoir une résistance à la

compression d'environ 33 MPa à 28 jours plutôt que 28 MPa. Cette valeur demeure légèrement inférieure au 35 MPa visé ce qui signifie que la formulation est peut-être mal adaptée au béton de laboratoire. Cela a cependant peu d'influence puisque le but ultime est d'observer la variation de la résistance à la compression pour des bétons avec et sans eau recyclée.

Deux autres mélanges ont des résistances considérablement inférieures à 35 MPa à 28 jours. Il s'agit des mélanges 35 AE 50 A et 35 AE 50 B. Or, à 20 minutes, la teneur en air de ces deux mélanges est respectivement de 12,2 % et 12,0 %. Cela explique la chute importante de résistance, qui ne serait probablement pas problématique si la teneur en air était maîtrisée. La résistance est d'ailleurs adéquate pour les trois autres mélanges dont l'adjuvantation a été modifiée, soit 35 AE 50 C, 35 AE 50 D et 35 AE 50 E. Les teneurs en air respectives, 5,6 %, 7,5 % et 8,8 % sont plus appropriées et permettent d'atteindre, voire de dépasser la résistance escomptée à 28 jours. À noter qu'il est difficile d'analyser l'évolution de la résistance à la compression des bétons 35 MPa avec air entraîné car les teneurs en air varient considérablement (de 6,5 % à 13,5 %).

Enfin, les résistances à jeune âge sont particulièrement élevées, ce qui peut être associé à l'effet « filler » ou à l'effet nucléation des fines particules. Ces résistances élevées à jeune âge sont plus marquées, ce qui est également attribuable au rapport E/C plus faible propre au mélange 35 MPa.

6.2.2. Résistance aux cycles de gel – dégel

La figure 6.24 présente le facteur de durabilité des bétons exposés aux cycles de gel - dégel, qui est une forme d'expression de la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore longitudinale dans le béton testé.

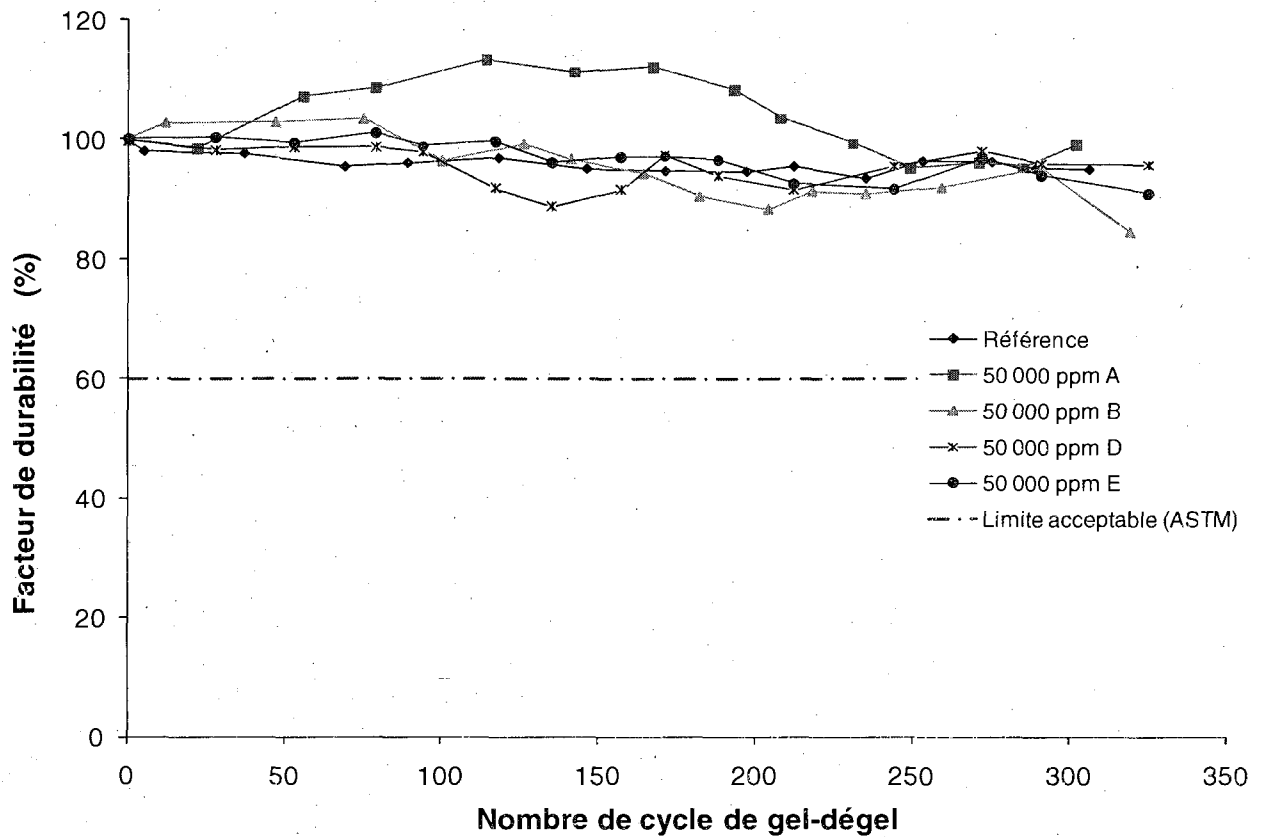


Figure 6.24 Résistance aux cycles de gel-dégel - 35 MPa avec air entrainé

L'onde se propage plus rapidement dans un solide que dans le vide. Elle est donc plus rapide dans un échantillon sain et peu dégradé par le gel - dégel. Au fur et à mesure que l'échantillon de béton se dégrade, si le facteur de durabilité demeure supérieur à 60 %, le béton est jugé comme durable et résistant aux cycles de gel - dégel.

La figure 6.24 présente donc des bétons qui sont tous jugés comme résistants et durables lors des cycles de gel - dégel. La vitesse de l'onde est aussi liée aux propriétés élastiques du matériau, dont le module d'Young (E). Plus le béton est fissuré, plus le module d'Young diminue. Le facteur d'espacement des bulles d'air a une influence sur la durabilité des bétons. Étant en moyenne 232 μm pour les bétons de la série 35 MPa fabriquée en laboratoire, il est amplement inférieur à 400 μm qui est le facteur d'espacement critique pour des bétons de résistance nominale 35 MPa.

Bien que les courbes de la figure 6.24 aient un facteur de durabilité moyen de 93 % qui demeure stable malgré l'évolution des cycles de gel - dégel, il est possible d'observer certaines variations. Le mélange 35 AE 50 A présente notamment une hausse de la vitesse de propagation. Cela est attribuable au développement de résistance à plus long terme. En effet, il est possible qu'en vieillissant, le béton s'hydrate davantage, refermant les pores et diminuant ainsi les vides capillaires. Dans ce cas, une légère augmentation de la vitesse de propagation peut être observée au cours des premiers cycles de gel - dégel.

Enfin, des résultats complémentaires sont annexés (annexe F) sur les essais de gel - dégel, notamment des graphiques présentant la variation de la masse et de la longueur des échantillons. Il est néanmoins possible d'affirmer que les bétons 35 MPa avec eau recyclée fabriqués en laboratoire sont durables aux cycles de gel - dégel.

6.2.3. Résistance à l'écaillage

La résistance à l'écaillage des bétons est également un facteur explicite sur la durabilité des bétons. La figure 6.25 présente les cinq mélanges 35 MPa qui ont été soumis à des essais de durabilité, puisque leur teneur en air a été jugée satisfaisante.

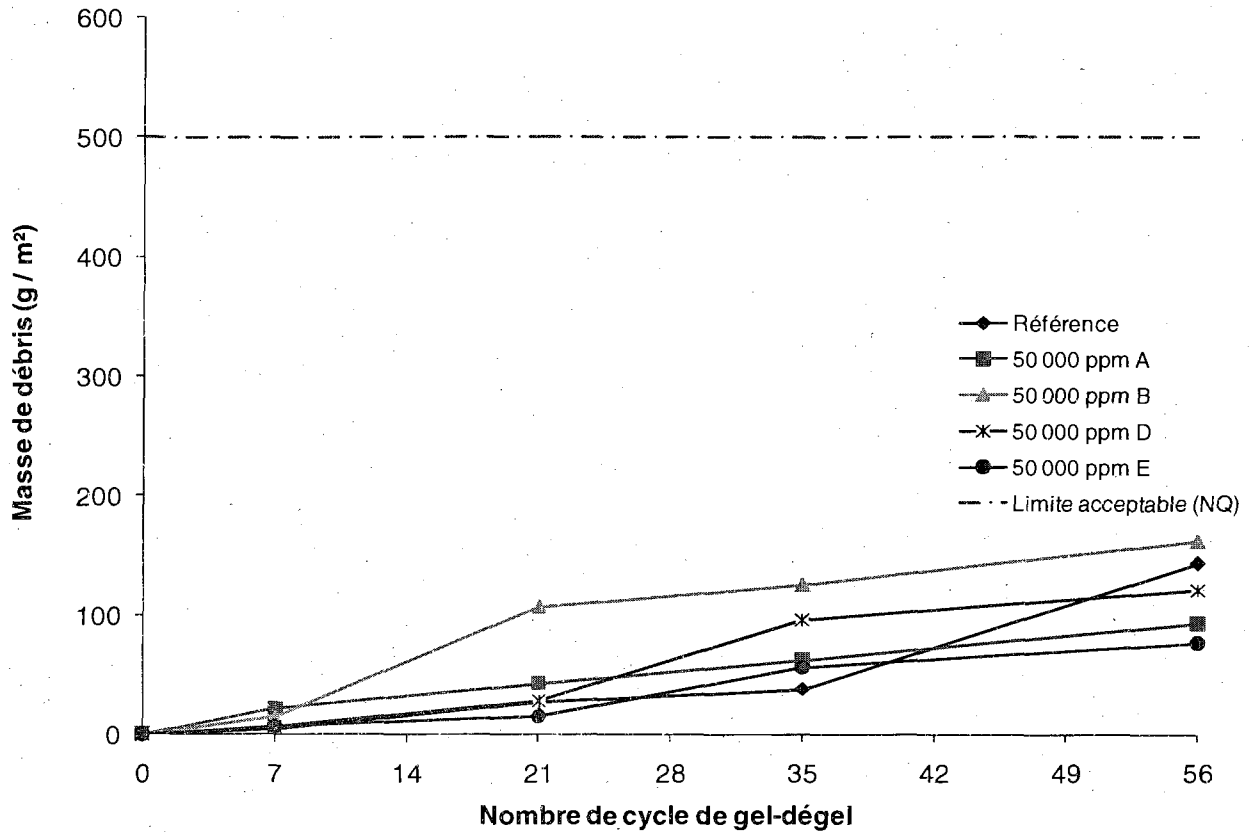


Figure 6.25 Résistance à l'écaillage - 35 MPa avec air entrainé

Après 56 cycles de gel - dégel, la masse de débris ramassée sur la surface de l'échantillon ne doit pas dépasser 500 g / m^2 . Tous les mélanges présentent une masse de débris inférieure à 162 g / m^2 . Les bétons sont donc tous parfaitement résistant à l'écaillage.

6.2.4. Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons durcis en laboratoire

Les résultats des essais en laboratoire montrent clairement que le remplacement de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée n'a pas d'effet négatif sur les propriétés du béton durci. Cette conclusion a pu être vérifiée par des eaux de gâchage contenant jusqu'à $75\,000 \text{ ppm}$ de particules en suspension.

Pour un rapport E/C réel constant, c'est-à-dire lorsque la maniabilité est ajustée par l'adjuvantation (réducteur d'eau, superplastifiant) et non pas par un ajout d'eau, l'utilisation d'eau recyclée engendre une légère augmentation de la résistance à tous les âges.

Pour une teneur en air constante, l'augmentation de résistance est relativement faible (inférieure à 10 %). Cette augmentation pourrait découler d'un effet filler engendré par les trop fines particules en suspension. Elle pourrait aussi résulter de l'activation de l'hydratation engendrée par les alcalis apportés par l'eau recyclée. Il faut noter que les quelques cas où la résistance à la compression des bétons avec eau recyclée était plus faible ont toujours pu être expliqués par une teneur en air plus élevée dans le béton avec eau recyclée que celle dans le béton de référence.

Globalement, tous les essais de durabilité au gel – dégel et à l'écaillage ont démontré que l'utilisation d'eau recyclée n'a pas d'effet sur la durabilité des bétons possédant un réseau de bulles d'air conforme aux exigences des normes.

6.3. Propriétés du béton frais en usine

Avant d'entreprendre l'analyse détaillée des résultats obtenus avec les bétons d'usine, il est important de rappeler que l'eau recyclée utilisée en usine est différente de l'eau recyclée utilisée en laboratoire (voir chapitre 4). En effet, l'eau recyclée d'usine comporte des particules en suspension beaucoup plus grossières que celles qui sont en suspension dans l'eau recyclée conservée en laboratoire. Compte tenu des mécanismes d'interaction déjà identifiés, une eau contenant des particules plus grossières devrait produire beaucoup moins d'effet sur les propriétés des bétons frais. C'est ce phénomène qui a fait en sorte que les bétons produits en usine ont pu être fabriqués avec des eaux de gâchage pouvant contenir plus de 100 000 pm de particules en suspension.

6.3.1. Affaissement

6.3.1.1. 25 MPa sans air entraîné

La figure 6.26 présente la variation de l'affaissement dans le temps des bétons de 25 MPa sans air entraîné fabriqués en usine. Les mesures d'affaissement ont été prises à 10 minutes, après les ajustements de mélange (20 minutes), à 40 et à 70 minutes.

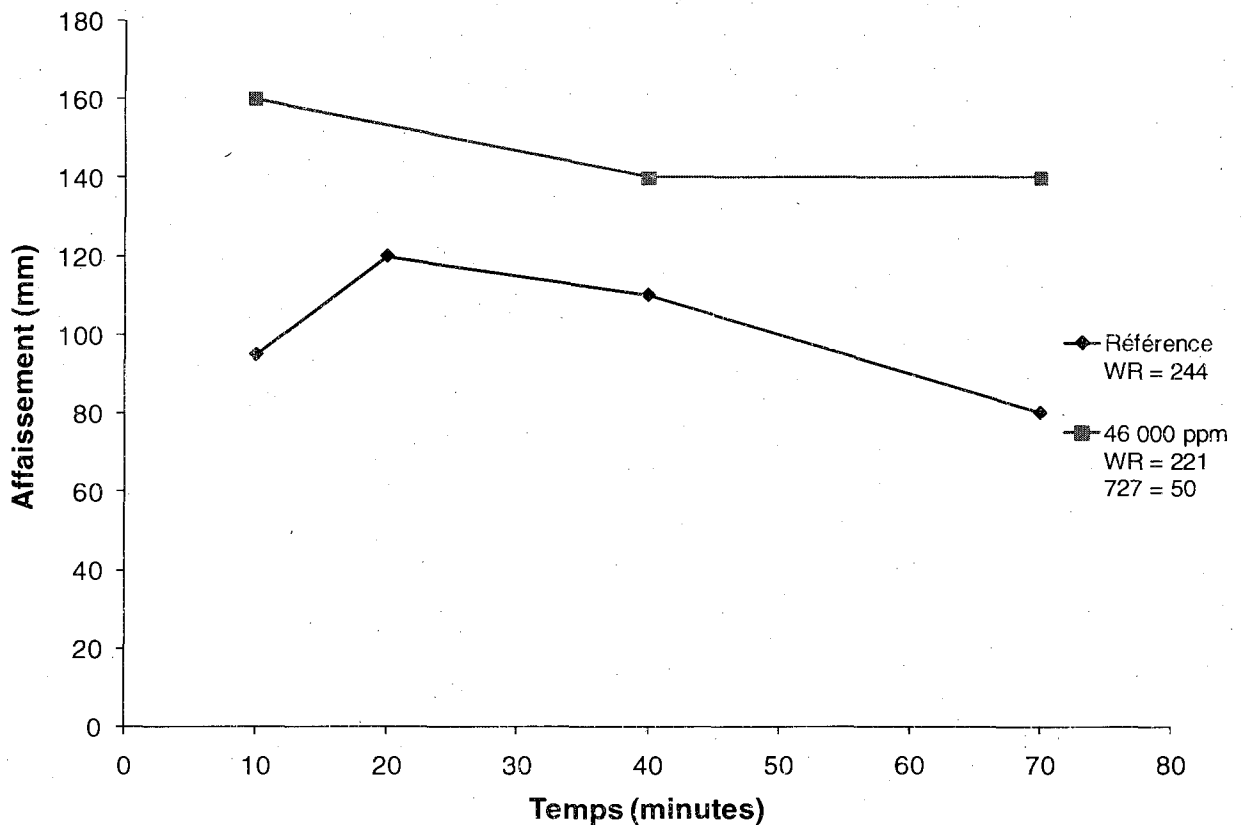


Figure 6.26 Variation de l'affaissement dans le temps - 25 MPa sans air entraîné

Les résultats d'affaissement obtenus en usine diffèrent de ceux obtenus en laboratoire. Pour les bétons 25 MPa SAE, seule la référence sans eau recyclée et un mélange adjuvanté ont été échantillonnés. En observant d'abord la référence, il est inhabituel d'observer un gain de maniabilité entre 10 et 20 minutes. Cela est simplement dû à l'ajout de $0,95 \text{ l} / \text{m}^3$ (1 gallon / 4 m^3) d'eau après environ 10 minutes afin de produire un mélange ayant un affaissement supérieur à 100 mm initialement. Lorsque le mélange est stabilisé et qu'aucun ajout d'eau ni

d'adjuvant n'est ajouté, l'affaissement diminue progressivement, mais demeure supérieur à 80 mm à 70 minutes.

Une fois la référence sans eau recyclée parfaitement ajustée, un second mélange est produit avec de l'eau recyclée concentrée à 46 000 ppm. Pour ajuster ce second mélange, 50 ml de retardateur de prise (727) est incorporé au mélange. La dose de réducteur d'eau (WR) demeure approximativement la même. Contrairement aux résultats de laboratoire, l'ajout d'eau recyclée ne diminue pas l'affaissement du béton produit. L'affaissement du mélange 25 SAE 46 débute à 160 mm et se maintient parfaitement dans le temps. Il est approximativement de 140 mm après 70 minutes. La qualité du malaxage et les particules plus grossières en suspension sont des facteurs qui influencent beaucoup ce résultat.

En usine, il est plus difficile de concevoir des bétons avec un rapport E/C constant. La référence 25 MPa SAE présente un rapport E/C de 0,69, alors que le mélange adjuvanté (25 SAE 46 A) a un rapport E/C réel de 0,68. Cet écart est relativement minime, et comme le rapport E/C du béton sans eau recyclée est supérieur, l'augmentation de l'affaissement ne peut pas être attribuée à une quantité d'eau plus importante. En bref, tel que démontré à la figure 6.26, l'affaissement des bétons 25 MPa SAE en usine n'est aucunement affecté par l'utilisation d'une eau recyclée traitée à 46 000 ppm.

6.3.1.2. 30 MPa sans air entraîné

La variation de l'affaissement dans le temps des bétons de 30 MPa sans air entraîné est présentée à la figure 6.27. Les valeurs d'affaissement ont été mesurées à 10, 20, 40 et 70 minutes. Cependant, la mesure à 10 minutes du béton fabriqué avec une eau de gâchage à 44 000 ppm n'a pas été mesurée avant l'ajustement du mélange.

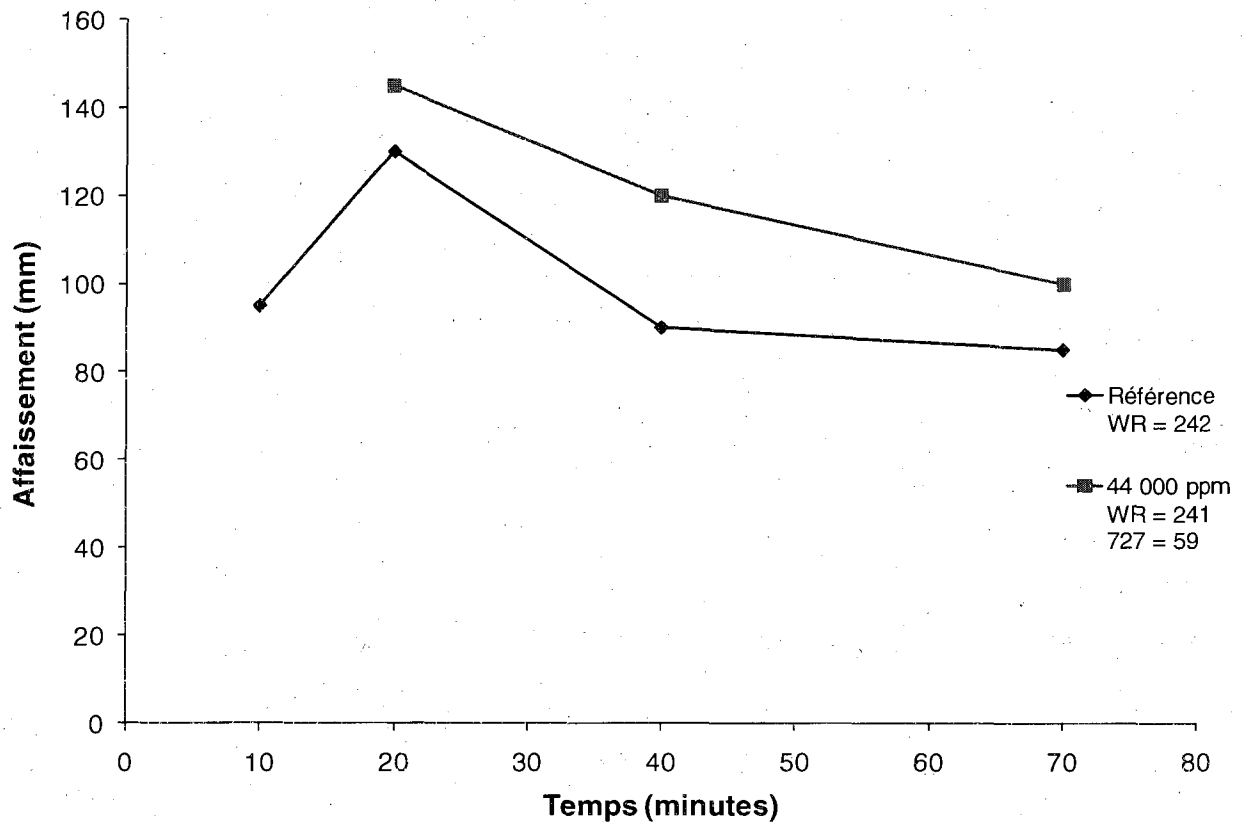


Figure 6.27 Variation de l'affaissement dans le temps - 30 MPa sans air entrainé

La figure 6.27 permet d'observer des résultats très semblables à ceux présentés à la figure 6.26. Pour les bétons 30 MPa SAE fabriqués en usine, la référence sans eau recyclée est ajustée entre 10 et 20 minutes afin d'obtenir un affaissement approprié, soit supérieur à 100 mm. Son rapport E/C est alors de 0,61. Une chute d'affaissement de 40 mm est observée entre 20 et 40 minutes, mais l'affaissement se stabilise entre 40 et 70 minutes.

L'ajout d'eau recyclée à 44 000 ppm diminue peu l'affaissement, qui débute à 145 mm à 20 minutes pour terminer à 100 mm après 70 minutes. Cela correspond aux objectifs approximatifs d'obtenir un affaissement entre 80 et 100 mm après 70 minutes. Les bétons 30 MPa SAE ne présentent donc aucun problème d'affaissement avec une eau recyclée dont la concentration est inférieure à 50 000 ppm.

6.3.1.3. 35 MPa avec air entrainé

Quatre bétons de résistance nominale de 35 MPa, avec air entrainé, sont présentés à la figure 6.28. Les mesures d'affaissement ont toutes été prises à 10, 20, 40 et 70 minutes. Le graphique présente le béton de référence, un béton fabriqué avec de l'eau de gâchage à 46 000 ppm sans modification de l'adjuvant et deux bétons contenant de l'eau de gâchage à 54 000 et 107 000 ppm, avec modification de l'adjuvantation.

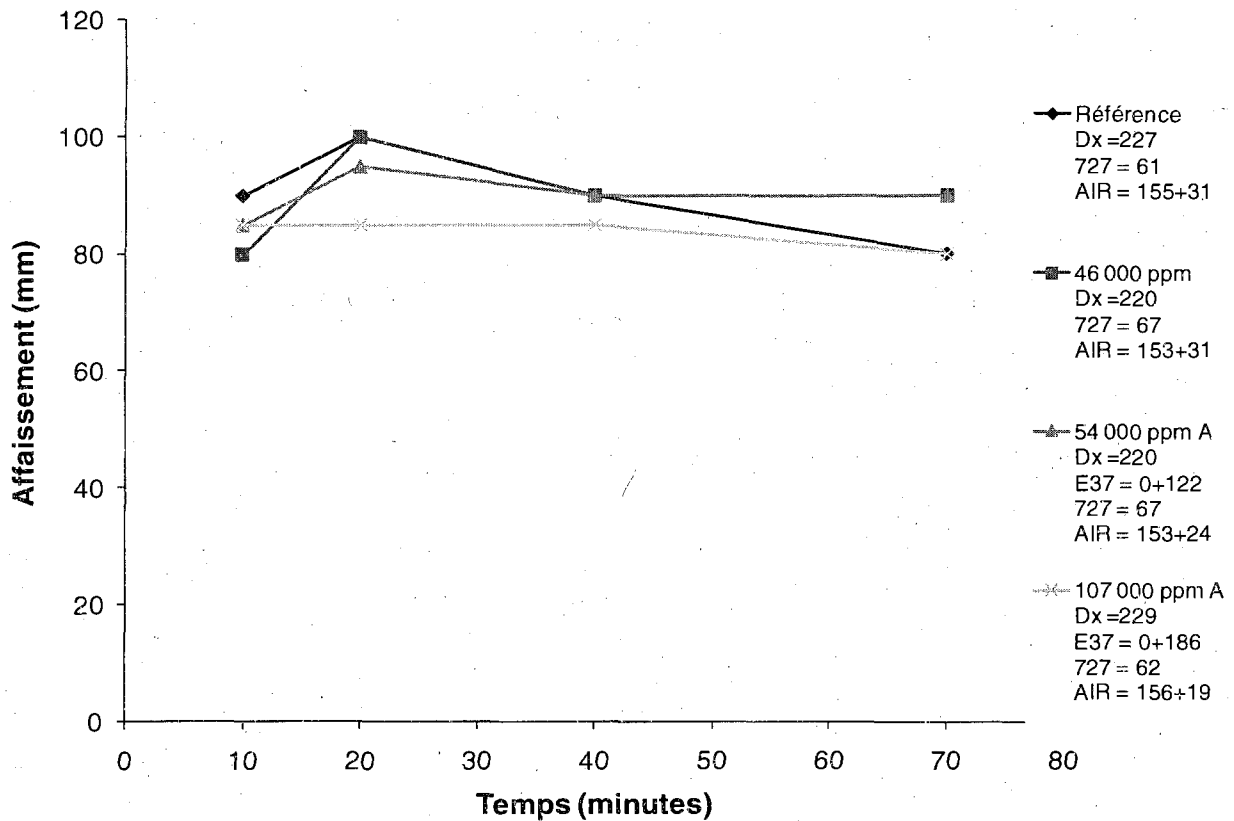


Figure 6.28 Variation de l'affaissement dans le temps - 35 MPa avec air entrainé

Sur la figure 6.28, les valeurs d'affaissement observées varient toutes entre 80 et 100 mm. Initialement, un ajout d'eau dans le béton de référence a permis d'obtenir un affaissement à 20 minutes de 100 mm qui est réduit à 80 mm à 70 minutes. Il n'a pas été difficile de reproduire ce mélange avec des bétons contenant de l'eau recyclée à 50 000 ppm \pm 5 000 ppm.

Le mélange avec de l'eau recyclée concentrée à 46 000 ppm comporte pratiquement la même adjuvantation que la référence sans eau recyclée. Son affaissement initial de 80 mm a dû être

compensé par un apport d'eau de $6 \text{ kg} / \text{m}^3$. Par la suite, la variation de l'affaissement est identique au mélange sans eau recyclée. Cela permet d'observer l'avantage d'utiliser du superplastifiant (Eucon 37), tel qu'observé au mélange 35 AE 54 A. Aucun ajout d'eau n'a été nécessaire, et l'affaissement demeure stable entre 85 et 95 mm tout au long de l'échantillonnage. Il est préférable d'ajuster un mélange contenant de l'eau recyclée avec des adjuvants qu'avec de l'eau, afin de conserver un rapport E/C stable qui permettra de développer de meilleures résistances et une bonne durabilité.

La fabrication d'un béton contenant presque uniquement de l'eau recyclée (107 000 ppm) ne produit pas du tout les effets néfastes observés en laboratoire. Au contraire, le mélange 35 AE 107 A n'a nécessité aucun ajout d'eau et l'affaissement est demeuré très stable dans le temps (entre 80 et 85 mm). La fabrication de ce béton se voulait un test afin d'observer la limite d'utilisation de l'eau recyclée et a permis de constater que l'eau de gâchage des bétons en laboratoire peut être constituée en très grande partie (voir uniquement) d'eau recyclée.

Finalement, toutes ses comparaisons ne sont viables que pour un rapport E/C relativement constant, ce qui est le cas. Le rapport E/C des bétons 35 MPA AE fabriqués en laboratoire varie entre 0,37 et 0,43, dépendamment du mélange et de la provenance des résultats. À ce stade-ci, il convient de mentionner que les analyses sur l'affaissement des bétons 35 MPa sont fiables puisque le rapport E/C est toujours semblables. La section 6.3.7. détaille davantage sur l'origine et la valeur des rapports E/C. L'eau recyclée n'affecte donc aucunement l'affaissement des bétons produits en usine. Tel que mentionné précédemment, cela découle essentiellement du fait que l'eau recyclée utilisée en usine contient des particules en suspension beaucoup plus grossières que celles dans l'eau recyclée conservée en laboratoire.

6.3.2. Teneur en air

Les bétons de 35 MPa avec air entraîné est le seul béton avec air fabriqué en usine. La variation du volume d'air de ces bétons à 10, 20, 40 et 70 minutes est présentée à la figure 6.29. Les bétons présentés à la figure 6.29 sont les mêmes que ceux de la figure 6.28 : une

référence, un béton à 46 000 ppm sans modification de l'adjuvantation et deux bétons avec modification de l'adjuvantation (54 000 et 107 000 ppm).

L'objectif quant au pourcentage d'air entraîné est de demeurer stable entre 5 % et 7 % jusqu'à 70 minutes après le contact eau - ciment. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6.29. La référence présente un pourcentage d'air faible à 10 minutes, soit 4,9 %. L'ajout de 31 ml d'Airextra a permis d'ajuster le volume d'air à 7,0 % à environ 20 minutes. Ce volume d'air a même légèrement augmenté à 40 minutes (7,6 %), ce qui peut également être attribuable à l'ajout d'une dose supplémentaire d'agent entraîneur d'air. Le volume d'air demeure stable par la suite, et ce, jusqu'à 70 minutes où il est de 7,3 %.

Le même processus est observé pour le mélange 35 AE 46. Aucune modification de l'adjuvantation n'a été apportée à ce mélange contenant de l'eau recyclée. La teneur en air initiale étant trop faible, l'ajout de 31 ml d'agent entraîneur d'air a permis d'augmenter le volume d'air qui demeure stable et est de 7,4 % à 70 minutes.

Dans le mélange 35 AE 54 A, contenant du superplastifiant, le volume d'air demeure faible au début. Un ajout de 24 ml d'agent entraîneur d'air permet d'augmenter le volume d'air et de le stabiliser. Ce mélange contient 6,9 % d'air à 70 minutes.

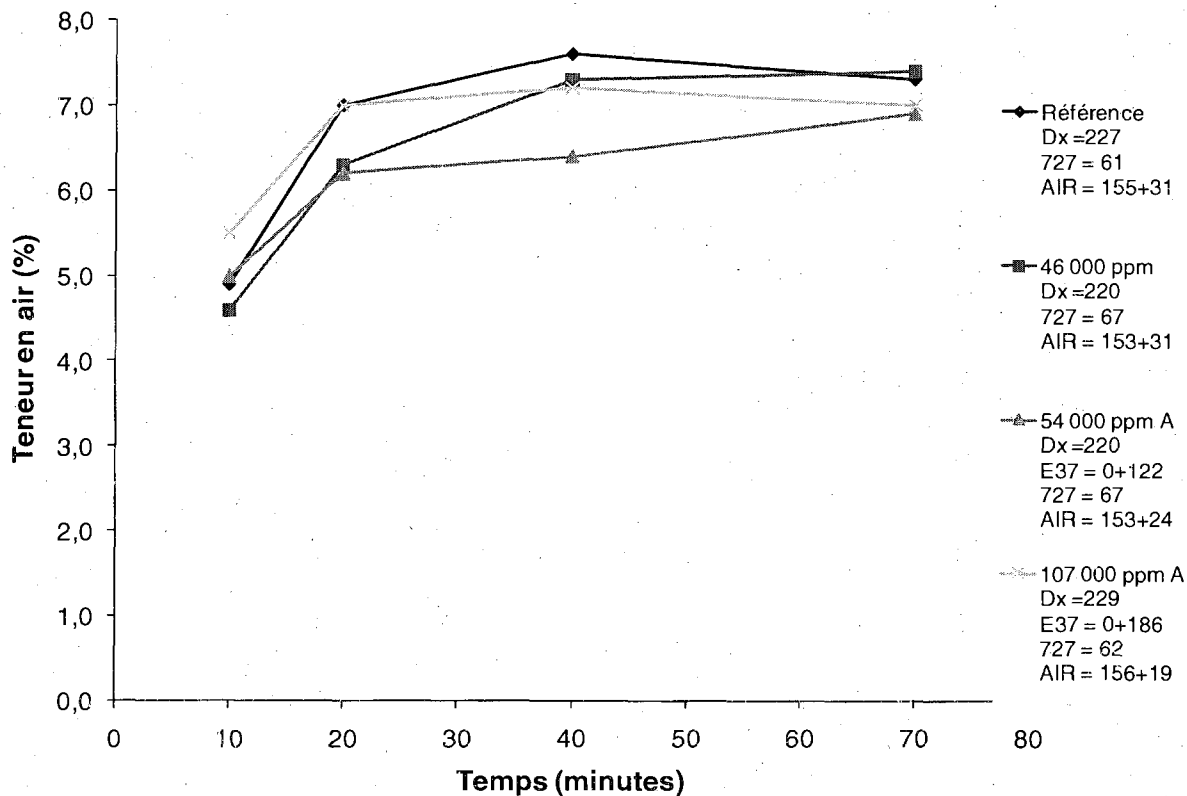


Figure 6.29 Évolution du volume d'air dans le temps - 35 MPa avec air entraîné

Enfin, même dans le cas d'un mélange contenant de l'eau recyclée à 107 000 ppm, aucune différence n'est observée sur le volume d'air. Initialement trop faible, (5,5 %), 19 ml d'agent entraîneur d'air ont été ajoutés et le volume d'air stabilisé et final est de 7,0 %, soit exactement ce qui était visé.

Globalement, ces résultats suggèrent que la dose d'agent entraîneur d'air incorporée initialement dans les différents mélanges de béton est un peu faible, puisque chacun des mélanges a nécessité des ajustements. Cependant, les ajouts d'agent entraîneur d'air ne sont pas plus importants lorsque de l'eau recyclée est ajoutée, et ce, même si la concentration est élevée (107 000 ppm) ou si aucun superplastifiant n'est utilisé (35 AE 46). L'incorporation d'eau recyclée dans le béton ne semble donc pas nuire à l'entraînement d'air des bétons fabriqués en usine.

6.3.3. Température

La température des bétons fabriqués en usine a été notée à titre indicatif. Les températures varient entre 20 ° C et 22 ° C pour les mélanges 25 MPa SAE, ce qui est à peine inférieur au 21 ° C à 23 ° C des bétons 30 MPa SAE et 35 MPa AE. Une quantité moins importante de ciment est incorporée dans les bétons 25 MPa, ce qui signifie qu'une moins grande chaleur est dégagée lors de l'hydratation.

Finalement, tous mélanges confondus, avec ou sans eau recyclée, la température varie uniquement de 3 ° C (entre 20 ° C et 23 ° C). L'utilisation de l'eau recyclée en usine n'a aucune influence sur la température des bétons produits.

6.3.4. Stabilité du réseau de bulles d'air

Le tableau 6.3 présente les caractéristiques initiales et à 80 minutes des bétons de 35 MPa avec air entraîné. Les caractéristiques présentées sont le volume d'air (béton frais et béton durci), la surface spécifique des bulles d'air et leur espacement.

Tableau 6.3 Réseau de bulles d'air — 35 MPa avec air entraîné (usine)

| Mélange | Initiale | | | | 80 minutes | | | |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| | Air - béton frais (%) | Air - béton durci (%) | α (1/mm) | L bar (μ m) | Air - béton frais (%) | Air - béton durci (%) | α (1/mm) | L bar (μ m) |
| 35 AE 0 | 7,0 | 4,0 | 32,4 | 183 | 7,3 | 4,8 | 33,4 | 161 |
| 35 AE 46 | 6,3 | 3,4 | 35,0 | 170 | 7,4 | 6,4 | 35,7 | 136 |
| 35 AE 54 A | 6,2 | 3,2 | 35,3 | 181 | 6,9 | 5,0 | 36,8 | 142 |
| 35 AE 107 A | 7,0 | 5,9 | 42,0 | 117 | 7,0 | 4,7 | 48,9 | 110 |

Les résultats du tableau 6.3 sont similaires à ceux observés pour les bétons fabriqués en laboratoire (tableaux 6.1 et 6.2). En effet, la quantité d'air observée au microscope (béton durci) est inférieure à la quantité d'air mesurée avec l'air mètre sur le béton frais. Les mesures sur le béton frais sont généralement supérieures d'environ 2 %.

La surface spécifique de tous les bétons fabriqués en usine est comprise entre 32 et 49 mm⁻¹ et l'espacement des bulles d'air est largement inférieur à 250 µm.

6.3.5. Temps de prise initial

Le tableau 6.4 présente le temps de prise des huit bétons fabriqués en usine. Le temps de prise de deux bétons de 25 MPa sans air, deux bétons de 30 MPa sans air et quatre bétons de 35 MPa avec air sont présentés dans ce tableau.

En moyenne, le temps de prise est de 6 h 30 pour les bétons 25 MPa SAE, 6 h 00 pour les bétons 30 MPa SAE et 7 h 00 pour les bétons 35 MPa AE. Ces valeurs correspondent tout à fait au temps de prise habituel de ces mélanges de béton.

La précision de l'essai de pénétration (temps de prise) est de 20 minutes. Or, à l'exception des bétons 30 MPa SAE qui présentent un écart de 25 minutes, les autres mélanges sont considérés comme ayant un temps de prise quasi identique. Il n'y a visiblement aucune corrélation entre l'ajout d'eau recyclée et le temps de prise des bétons, contrairement aux observations faites en laboratoire. Ainsi, basée sur les résultats du tableau 6.4, en usine, l'utilisation de l'eau recyclée traitée n'a pratiquement pas d'effet sur le temps de prise des bétons d'usine.

Tableau 6.4 Temps de prise initial des bétons fabriqués en usine

| Mélanges | Temps de prise (heures) |
|------------------|-------------------------|
| 25 SAE Référence | 6 h 30 |
| 25 SAE 46 A | 6 h 30 |
| 30 SAE Référence | 5 h 55 |
| 30 SAE 44 A | 6 h 20 |
| 35 AE Référence | 7 h 10 |
| 35 AE 46 | 6 h 55 |
| 35 AE 54 A | 7 h 05 |
| 35 AE 107 A | 6 h 50 |

6.3.6. Rapport E / L

Le tableau 6.5 permet de comparer le rapport E/L obtenu à partir des quantités de matériaux inscrites sur le bavard (E/C calculé) avec le rapport E/L obtenu suite à l'essai au micro-onde (E/C micro-onde). Les rapports E/L des huit bétons fabriqués en usine sont présentés dans ce tableau.

Tableau 6.5 Comparaison des rapports E/L des bétons fabriqués en usine

| Bétons usine | E/C micro-onde | E/C calcul bavard |
|-------------------|----------------|-------------------|
| 25-SAE- Référence | 0,61 | 0,69 |
| 25-SAE-46 A | 0,71 | 0,66 |
| 30-SAE- Référence | 0,60 | 0,61 |
| 30-SAE-44 A | 0,63 | 0,60 |
| 35-AE- Référence | 0,37 | 0,43 |
| 35-AE-46 | 0,41 | 0,43 |
| 35-AE-54 A | 0,39 | 0,39 |
| 35-AE-107 A | 0,41 | 0,37 |

Le déroulement de cet essai est décrit dans la section 3.9.10. Les résultats de la figure 6.30 permettent d'estimer le rapport E/C avec une précision absolue d'environ $\pm 0,05$. Le graphique permet d'observer que les résultats obtenus à partir de l'essai au micro-onde sont similaires à ceux calculés à partir des bavards. Il n'y a pas de corrélation directe d'augmentation ou de diminution, le rapport calculé étant parfois supérieur, parfois inférieur au E/C de l'essai au micro-onde.

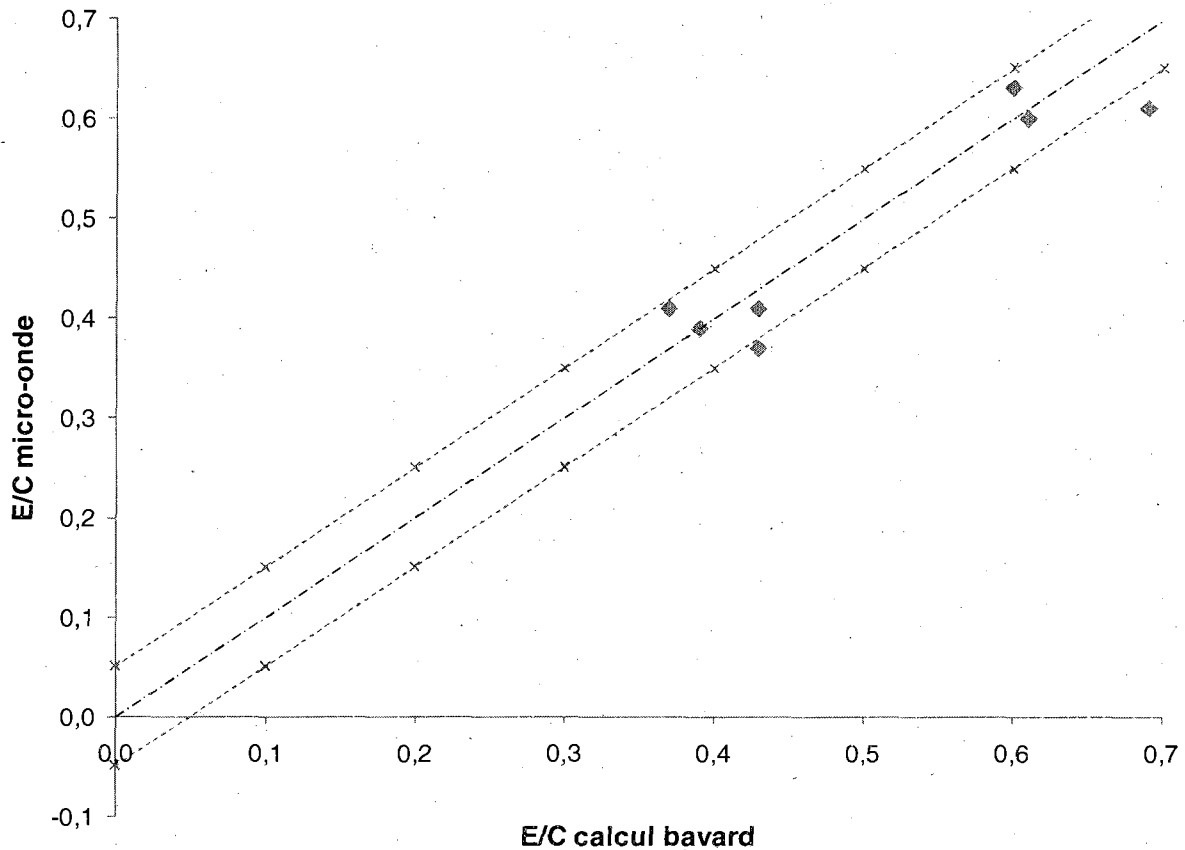


Figure 6.30 Comparaison des rapports E/C calculé (bavard) et E/C mesuré (micro-onde)

6.3.7. Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons faits en usine

L'analyse des résultats obtenus en usine démontre que l'eau recyclée d'usine engendre des effets beaucoup moins marqués sur les propriétés des bétons frais que l'eau recyclée conservée en laboratoire. En effet, en usine, il a été possible de produire des bétons tout à fait conformes en utilisant une eau recyclée ayant plus de 100 000 ppm de particules en suspension. Pour ce béton, une modification mineure de l'adjuvantation (faible dose de retardateur de prise) permet de compenser complètement les effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais. L'entraînement d'air et l'affaissement ne sont pas significativement affectés par l'eau recyclée lorsque la concentration est inférieure à 100 000 ppm dans l'eau de gâchage.

Globalement, ces résultats démontrent que l'eau recyclée fraîchement prélevée dans le bassin d'homogénéisation de l'usine produit très peu d'interactions sur les propriétés des bétons frais. Des résultats similaires avaient été obtenus suite aux travaux de Blanchard [Blanchard 2008]. Cependant, dans ces travaux, la teneur maximale de solides en suspension avait été limitée à 67 000 ppm. Il est fort probable que la dimension plus grossière des particules en suspension dans l'eau recyclée fraîchement prélevée soit responsable de cette faible interaction sur les propriétés des bétons frais.

6.4. Propriétés du béton durci en usine

6.4.1. Résistance à la compression

6.4.1.1. 25 MPa sans air entrainé

La résistance à la compression des bétons de 25 MPa sans air entrainé est présentée à la figure 6.31. La résistance à la compression a été mesurée à 1, 7 et 28 jours, et ce pour le béton de référence (sans eau recyclée) et pour le béton fabriqué avec de l'eau de gâchage à 46 000 ppm.

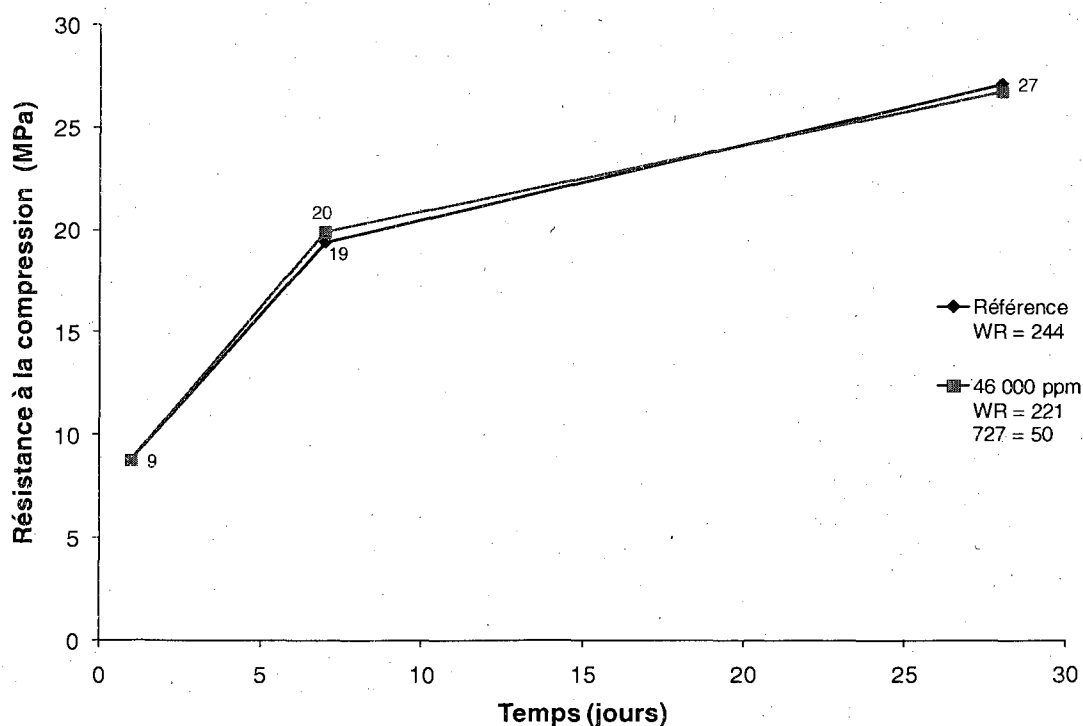


Figure 6.31 Résistance à la compression - 25 MPa sans air entrainé

6.4.1.2. 30 MPa sans air entraîné

La figure 6.32 présente la résistance à la compression à 1,7 et 28 jours des bétons de 30 MPa sans air entraîné fabriqués en usine. Le béton de référence, sans eau recyclée, et le béton fabriqué avec une eau de gâchage à 44 000 ppm (avec modification de l'adjuvantation) sont présentés.

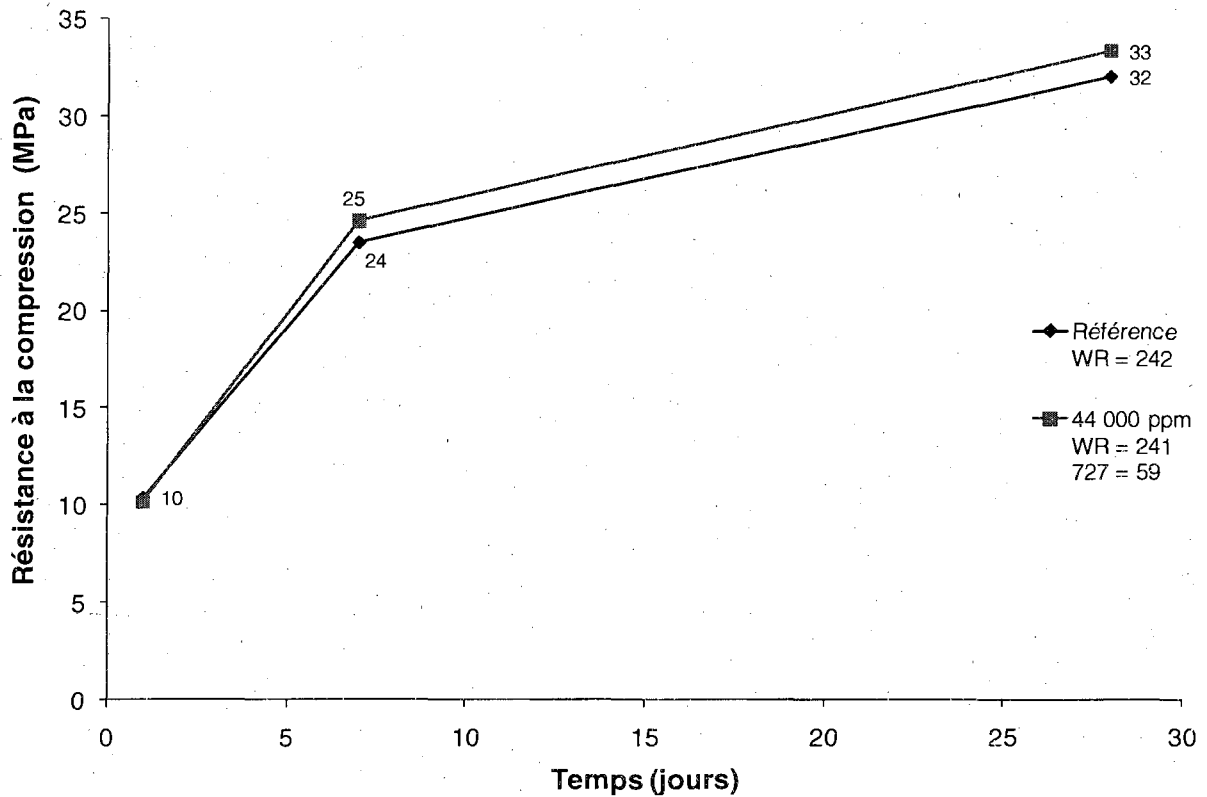


Figure 6.32 Résistance à la compression - 30 MPa sans air entraîné

Pour les figures 6.31 et 6.32, la résistance atteinte à 28 jours est supérieure de 2 MPa à la résistance nominale visée. Il n'y a aucun écart considérable (uniquement des écarts de 1 MPa) entre les résistances obtenues pour les bétons avec et sans eau recyclée. Ces deux figures suggèrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués en usine n'est pas influencée par l'ajout d'eau recyclée, si la concentration est inférieure à 50 000 ppm.

6.4.1.3. 35 MPa avec air entrainé

La figure 6.33 présente la résistance à la compression des bétons de 35 MPa avec air entrainé fabriqués en usine. Deux mélanges avec l'adjuvantage de base (Référence et 46 000 ppm) sont présentés, ainsi que deux mélanges avec modification de l'adjuvantage (54 000 et 107 000 ppm).

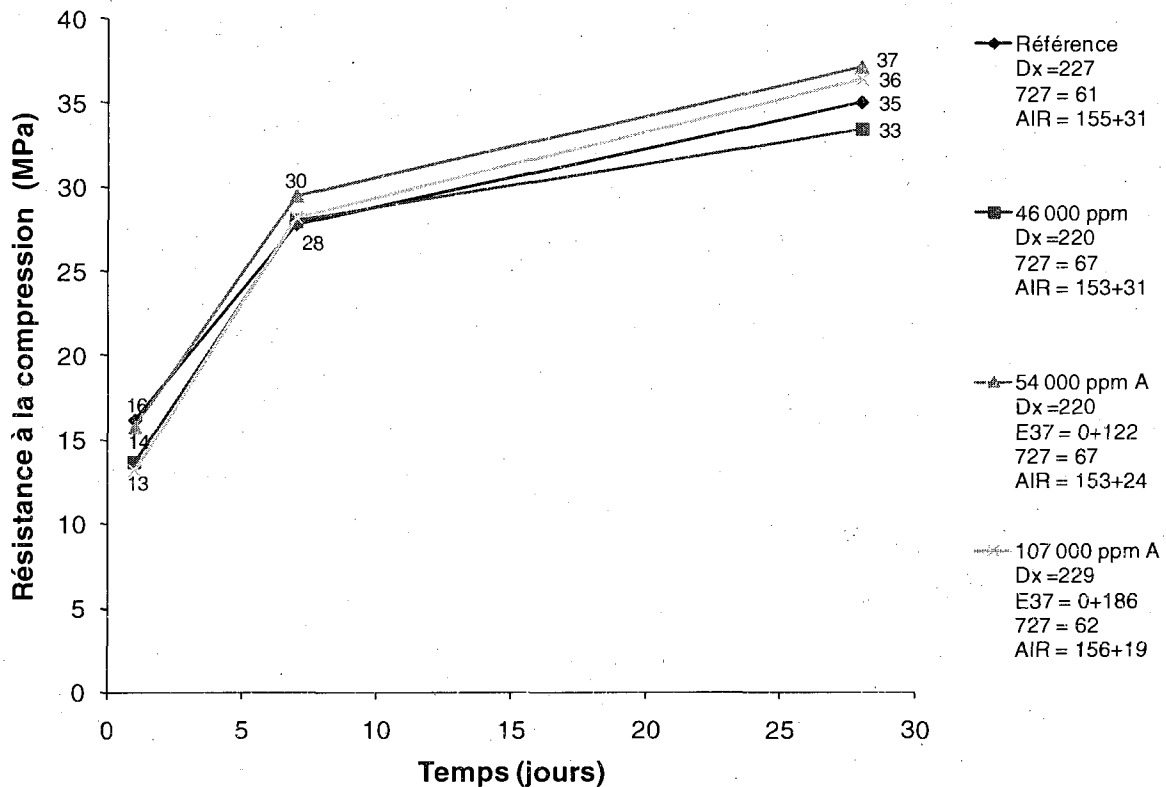


Figure 6.33 Résistance à la compression - 35 MPa avec air entrainé

Dans le cas des bétons de la figure 6.33, il y a de faibles écarts de résistance. Tout d'abord, la référence sans eau recyclée a une résistance de 35 MPa exactement à 28 jours. Cela est acceptable, mais ne permet pas de marge de manœuvre si de l'eau devait être ajoutée dans le béton sur le chantier.

Par la suite, l'ajout d'eau recyclée sans aucun adjuvant supplémentaire (35 AE 46) montre une diminution de 2 MPa à un jour et à 28 jours. Cet écart est néanmoins minime. Il ne peut pas être attribué à l'augmentation du rapport E/C, puisque ce rapport est le même pour la

référence et pour le mélange 35 AE 46 soit 0,43. Or, avec un écart si minime et une seule donnée comme source, il n'est pas possible de déduire que l'utilisation de l'eau recyclée dans les bétons d'usine entraîne une diminution de la résistance à la compression. Il est possible que cette faible différence résulte d'une faible variation du volume d'air, d'un béton à l'autre.

D'ailleurs, pour un même mélange avec eau recyclée, mais contenant cette fois du superplastifiant (35 AE 56 A), la résistance à un jour est identique au béton de référence, et supérieure de 2 MPa à sept et 28 jours.

Quant au béton contenant de l'eau recyclée à 107 000 ppm, il présente la résistance à un jour la plus faible (13 MPa), mais teste également 28 MPa et 36 MPa à sept et 28 jours. Ces résistances sont quasi identiques à celles du béton de référence.

Comme les écarts sont minimes, il est possible d'affirmer que l'utilisation de l'eau recyclée ne diminue pas significativement la résistance à la compression des bétons.

6.4.2. Résistance aux cycles de gel - dégel

6.4.2.1. 35 MPa avec air entrainé

La résistance aux cycles de gel – dégel des bétons de 35 MPa avec air entrainé est présentée à la figure 6.34. En plus des quatre bétons 35 MPa fabriqués en usine, une courbe illustre la limite acceptable de la variation de la vitesse au carré selon la norme ASTM, norme utilisée lors de la réalisation des essais de gel – en laboratoire.

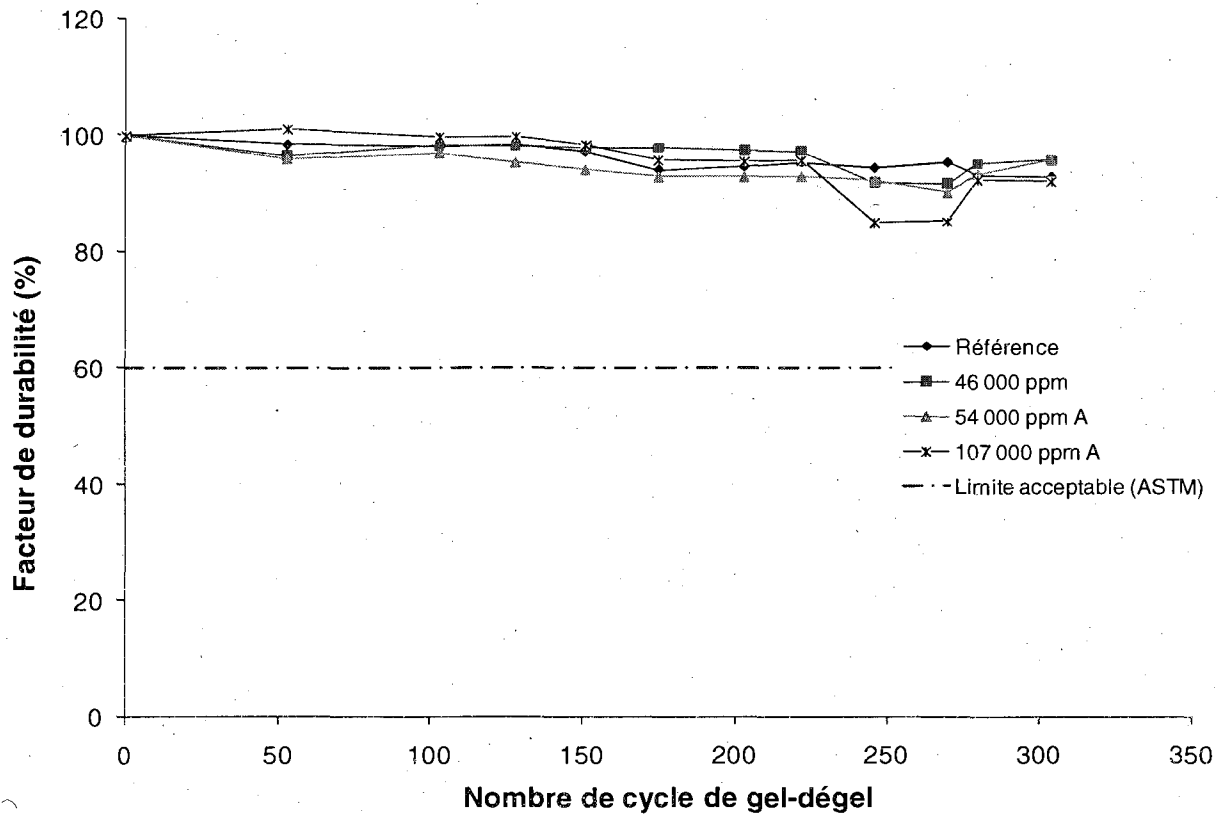


Figure 6.34 Résistance aux cycles de gel-dégel - 35 MPa avec air entrainé

Le facteur de durabilité après 300 cycles des bétons fabriqués en usine est en moyenne de 95 %, tel qu'illustré à la figure 6.34. Cela est de beaucoup supérieur au 60 % exigé par la norme ASTM. Le b ton de référence 0 ppm présente une courbe qui diminue très peu avec l'augmentation du nombre de cycles de gel - dégel, ce qui signifie que l'échantillon ne se détériore presque pas.

Des courbes supplémentaires de caractérisation de la durabilité aux cycles de gel - dégel des bétons 35 MPa fabriqués en usine sont disponibles en annexe F. Les variations de masse et de longueur des poutres y sont présentées.

6.4.3. Résistance à l'écaillage

6.4.3.1. 35 MPa avec air entrainé

La figure 6.35 présente la variation de la masse de débris (g / m^2) en fonction du nombre de cycle de gel – dégel (résistance à l'écaillage) des bétons de 35 MPa avec air entraîné. Les quatre bétons de 35 MPa fabriqués en usine sont présentés de même que la limite acceptable de masse de débris fixée par la norme NQ, norme utilisée lors de la réalisation des essais.

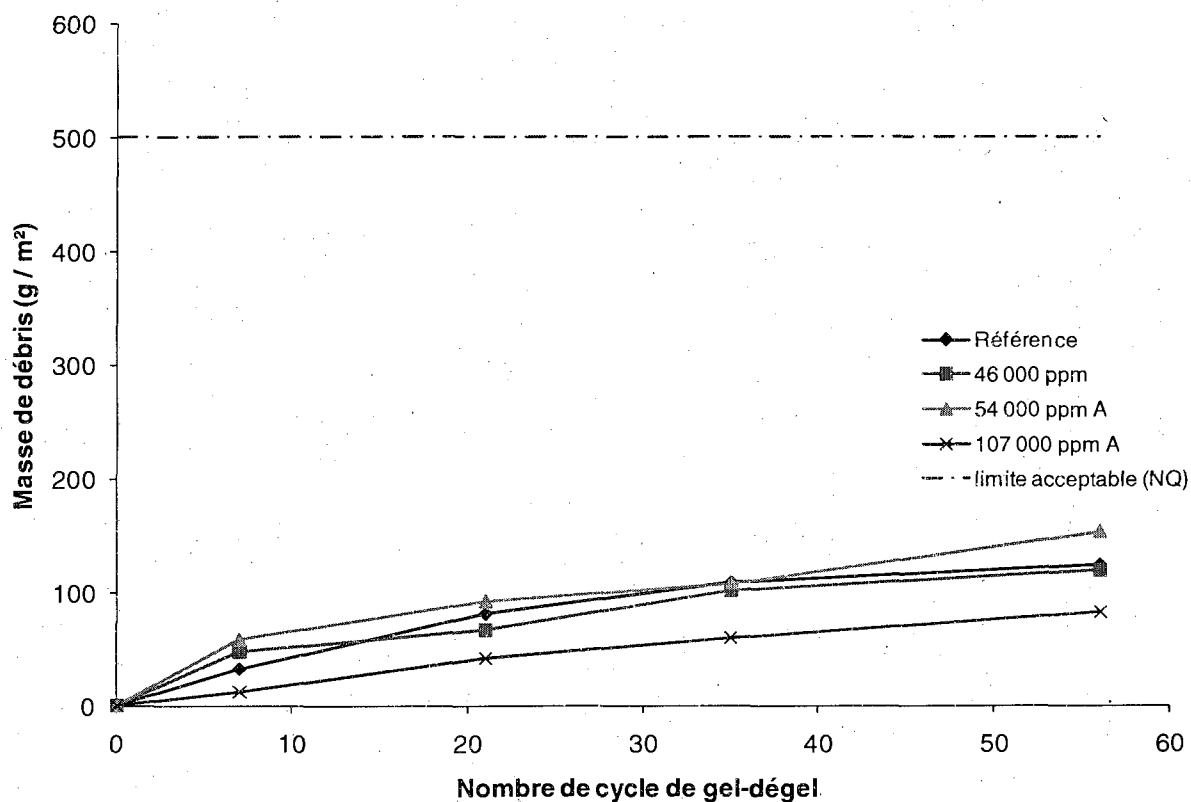


Figure 6.35 Résistance à l'écaillage - 35 MPa avec air entrainé

La figure 6.35 valide la bonne résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée traitée lorsqu'ils sont soumis à des cycles de gel-dégel. La masse des débris cumulés après 56 cycles est dans tous les cas inférieure à $153 \text{ g} / \text{m}^2$ (54 000 ppm A) ce qui est amplement inférieure à la valeur de $500 \text{ g} / \text{m}^2$ stipulée dans la norme québécoise.

Suite aux résultats présentés aux figures 6.34 et 6.35, il est possible de conclure que les bétons fabriqués en usine contenant de l'eau recyclée résistent bien aux cycles de gel-dégel et ne démontrent aucun problème d'écaillage lorsque leur réseau de bulles d'air entraîné est conforme aux exigences des normes.

6.4.4. Synthèse des effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons durcis en usine

L'utilisation de l'eau recyclée ne semble avoir aucun effet sur la résistance à la compression des bétons fabriqués en usine. En effet, pour tous les bétons (25 SAE, 30 SAE et 35 EA), la résistance nominale visée à 28 jours a été atteinte. La seule exception est le béton 35 AE 46 dont l'adjuvantation n'a pas été modifiée malgré l'ajout d'eau recyclée. La résistance de ce béton a atteint 33 MPa à 28 jours, soit 2 MPa de moins que la valeur escomptée.

Les bétons avec eau recyclée respectent tous le facteur de durabilité exigé par la norme ASTM. Le facteur de durabilité moyen des bétons avec eau recyclée après 300 cycles est de 95 % alors que la norme exige 60 %.

Les bétons avec eau recyclée ont également une très bonne résistance à l'écaillage. La masse de débris cumulés lors des essais d'écaillage est au moins trois fois plus faible que la limite acceptable selon la norme NQ.

CONCLUSION

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- ❖ Le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée, sans aucune autre modification du dosage, produit une diminution de l'affaissement, un raccourcissement du temps de prise et une diminution du volume d'air entraîné. Plus la concentration des particules solides en suspension est élevée, plus les effets de l'eau recyclée sont importants. Pour une teneur en solides en suspension donnée, les effets de l'eau recyclée sont plus marqués lorsque le rapport E/L est faible.
- ❖ Lorsque les pertes d'affaissement, consécutives à l'utilisation d'eau recyclée, ne sont pas annulées par un ajout d'eau, l'eau recyclée n'engendre pas de perte de résistance mécanique, quel que soit l'âge du béton. En général, on mesure plutôt une augmentation de la résistance (de 1 à 2 MPa), notamment celle au jeune âge (1-7 jours).
- ❖ L'eau recyclée engendre toujours une perte d'affaissement. Cette perte d'affaissement augmente lorsque la concentration des solides en suspension dans l'eau de gâchage augmente. Il est possible de compenser totalement ou partiellement la perte d'affaissement en augmentant le dosage en réducteur d'eau des bétons de 25 MPa avec ou sans air entraîné. Dans le cas des bétons de 30 et 35 MPa, les importantes pertes d'affaissement peuvent être maîtrisées par l'utilisation d'un superplastifiant. Cependant, pour ces deux types de bétons, il n'a pas été possible d'utiliser une eau de gâchage à plus de 50 000 ppm.
- ❖ Globalement, l'eau recyclée diminue fortement l'efficacité de l'agent entraîneur d'air. Il est cependant possible de compenser cette perte d'efficacité par un surdosage de l'adjuvant. En présence d'eau recyclée, les dosages en adjuvants entraîneurs d'air peuvent être de 5 à 20 plus élevés. Les dosages les plus élevés sont requis dans les bétons de faible rapport E/L (35 MPa).
- ❖ Le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée n'engendre pas de perte de résistance à la compression, quel que soit l'âge du béton.

- ❖ L'eau recyclée utilisée en laboratoire présente des caractéristiques différentes de celle utilisée en usine : les particules sont plus fines (classe dominante entre 10 et 20 μm) et plus colloïdales, comparativement aux particules sableuses de l'eau utilisée en usine. La grande finesse des particules contenues dans l'eau de laboratoire est attribuable au malaxage dans les barils, et cette eau est moins représentative de l'eau recyclée utilisée en industrie.
- ❖ Les effets de l'eau recyclée sur le béton sont accentués lors de la fabrication de bétons de laboratoire. Lors de la production en usine, avec de l'eau concentrée jusqu'à 50 000 ppm, il n'est pas nécessaire de modifier l'adjuvantation des mélanges pour obtenir des bétons ayant les propriétés escomptées.
- ❖ D'un point de vue environnementaliste, l'utilisation de l'eau recyclée dans le béton permet d'éviter les rejets d'eau dans les systèmes municipaux et d'économiser l'eau potable. Le projet s'inscrit donc adéquatement dans le contexte actuel de développement durable, ce qui laisse présager que l'eau recyclée sera plus fréquemment utilisée dans les bétons prêt à l'emploi.

BIBLIOGRAPHIE

- AİTCIN P.C., (2008) *Binders for durable and sustainable concrete*, Modern concrete technology series, n° 16, Canada et États-Unis, 500p.
- AİTCIN P.C., (2003) *Les liants hydrauliques : le ciment du béton*, Notes de cours, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Janvier 2003, 1021 p.
- ASTM C94/C 94M – 04, (2004) *Standard specification for ready-mixed concrete*, ASTM International, États-Unis, 10p.
- BARFOOT J., (1989) *Wash water revolution for ready mix plants*, Concrete, Vol 23, n° 10, Novembre 1989, p.37-39.
- BAUMA, (1995) *Residual concrete recycling and water re-utilisation in precast concrete work*, Betonwerk und Fertigteiltechnik, Vol 61, n° 8, Août 1995, Allemagne, p. 97-102.
- BLANCHARD S. (2008) *Caractéristiques des eaux recyclées traitées*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, 94p.
- BNQ 2621-900 (2002), *Bétons de masse volumique normale et constituants*, Bureau de normalisation du Québec. Québec, Canada, 37 p.
- BORGER, J., CARRASQUILLO R. et FOWLER D., (1994) *Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete*, Mars 1994, p. 267-274.
- CHATVEERA B., LERTWATTANARUK P. et MAKUL N., (2006) *The effects of sludge water on mechanical properties and durability of concrete*, Cement and concrete composites, Vol. 28, n° 5, Mai 2006, Thaïlande, p. 441-450.
- CHINI A. R., MUSZYNSKI L. C., BERGIN M. et ELLIS B. S., (2001) *Reuse of wastewater generated at concrete plants in Florida in the production of fresh concrete*, Concrete Research, Vol 53, n° 5, Octobre 2001, Floride, États-Unis, p. 311-319.
- CONCRETE ENGINEERING INTERNATIONAL, (2004) *Water treatment plant rounds off the concrete recycling process*, Water supply and treatment, Vol 8, n° 1, p.42.
- CSA A23. 1– 04, (2004) *Béton: constituants et exécution des travaux*, Association canadienne de normalisation, Canada, Septembre 2005, 479 p.
- EUCLID Canada 2007
Le site Internet de Euclid Chemical, section products, consulté le 21 août 2007 :
http://www.euclidchemical.com/product_catalog.asp

- GAGNE R. et BLANCHARD S., (2006) *Influence de l'eau recyclée traitée sur les propriétés des bétons*, Recueil de conférences (RF)²B, Juin 2006, Toulouse, 15p.
- GAGNE R., (2000) *Durabilité et réparations du béton*, Notes de cours, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Janvier 2000, 324 p.
- GRIFFITHS D., (2006) *Filtration and neutralization of concrete wash water*, Concrete international, Vol. 28, n° 6, Juin 2006, p. 60-62.
- HE Z. et LI Z., (2005) *Influence of alkali on restrained shrinkage behaviour of cement-based materials*, Cement and concrete research 35, Juin 2004, Chine, p. 457-463.
- INFORBLOC, (2005) *Recycler le béton frais, un enjeu écologique*, Journal de Ciment Saint-Laurent, Vol. 22, n° 2, Septembre 2004, Québec, 4 p.
- INFORBLOC, (2005) *Une jeune chercheuse au Coeur de l'action*, Journal de Ciment Saint-Laurent, Vol. 22, n° 2, Septembre 2005, Québec, 1p.
- JAWED I. et SKALNY J., (1978) *Effects of alkalies on hydration and performance of Portland cement*, Cement and concrete research, Vol. 8, n° 1, Octobre 1977, États-Unis, p. 37 à 52.
- KÓSMATKA S. et autres, (2004) *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Association canadienne du ciment, septième édition, Canada, 355 p.
- LINDON S., (2005) *Towards zero waste*, Concrete Society, Vol. 39, n° 5, Mai 2005, Royaume-Uni, p. 50-52.
- MALISCH W.R., (1996) *Returned concrete, wash water, and wastewater management*, Aberdeen' concrete journal, Mars 1996, Vol 14, n° 3, p.169-175.
- MATON P. M. et CHATENET S., (1992) *Ensemble des technologies propres en France*, Office international de l'eau, France, 3p.
- MUSZYNSKI L. et CHINI A., (2002) *Re-using wash water in ready-mixed concrete operations*, Concrete, Vol 36, n° 2, Février 2002, p. 16-18.
- NELMS C., RUSSELL A.D., LENCE B.J. (2005) *Assessing the performance of sustainable technologies for building projects*, Revue canadienne de génie civil, Vol. 32, n° 1, p. 114-128.
- ODD GJORV E. et SAKAI K., (2000) *Concrete technology for sustainable development in the 21st century*, E & FN Spon, Canada et États-Unis, 386 p.
- OLDER I. et WONNEMANN R., (1983) *Effect of alkalies on Portland cement hydration*, Cement and concrete research, Vol. 13, n° 6, Juillet 1983, États-Unis, p. 771-777.

- PAOLINI M. et KHURANA R., (1998) *Admixtures for Recycling of Waste Concrete*, Cement and concrete composites 20, Royaume-Uni, p. 221-229.
- PIGEON M., PLANTE P., PLEAU R. et BANTHIA N., (1992) *Influence of soluble alkalis on the production and stability of the air-void system in superplasticized and nonsuperplasticized concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 89, n° 1, p 24-31.
- SANDROLINI, F. et FRANZONI E., (2001) *Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants*, Cement and concrete research 31, Octobre 2000, Italie, p. 485-489.
- SEALEY B. J., PHILLIPS P. S. et HILL G.J., (2001) *Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry*, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 32, Issues 3-4, Juillet 2001, p. 321-331.
- SELIH J., MILOST E. et CUZNAR A., (2003) *Use of recycled rubble-based aggregate and recycled water in concrete*, Recycling and reuse of waste materials, Proceeding of the international symposium, 2003, Slovénie, p. 465-473.
- SMAOUI N., BERUBE M.A., FOURNIER B., BISSONNETTE B. et DURAND B., (2005) *Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete*, Cement and concrete research 35, Mai 2004, Canada, p. 203-212.
- SU, N., MIAO B. et LIU F. S., (2002) *Effect of wash water and underground water on properties of concrete*, Cement and concrete research 32, Décembre 2001, p. 777-782.
- TAGNIT-HAMOU A., *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*, Notes de cours, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, 287 p.
- UCHIKAWA, H. (2000) *Sustainable development of the cement and concrete industry, Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*, Gjørv, O.E. et Sakai, K. Éditeur, E & FN SPON, p. 177-205.
- VICKERS G., (2002) *Gray water recycling basics*, Concrete producer, Vol. 20, n° 9, Septembre 2002, p. 31-33.
- VICKERS G., (2003) *Gray water recycling: with the decision made, how will it affect your batching?*, Concrete producer, 2003.
- VICKERS G., (2003) *Gray water recycling*, Concrete producer, Vol. 21, n° 4, Avril 2003, p. 32-35.

Annexe A

Fiche technique des granulats



Labo S.M. inc.

No rapport: 07LS0327

Montréal
Tel.: (514) 332-6001
Télex.: (514) 332-1593
Lac-Mégantic
Tel.: (819) 583-4255
Télex.: (819) 583-1597

Longueuil
Tel.: (450) 551-0351
Télex.: (450) 551-9542
Gatineau
Tel.: (819) 775-4747
Télex.: (819) 775-9326

Sherbrooke
Tel.: (819) 566-8988
Télex.: (819) 633-4377
St-Jean-sur-Richelieu
Tel.: (514) 332-6001
Télex.: (514) 332-1963

RAPPORT D'ANALYSE DES MATÉRIAUX

| | | | |
|-----------------|--|--------------------------|-------------------------------|
| No dossier: | S070000037 | Type matériau: | Pierre concassée |
| No laboratoire: | 07-0242 | # réf.: | |
| Client: | Graymont (Qc) inc. | Calibre: | 20-5 gr.1 |
| Adresse: | 303, Principale Ouest | Usage: | Béton de ciment |
| Ville: | Marbleton (Québec) | Prélevé par: | Client, le: 2007-05-02 |
| Code postal: | J0B 2L0 | Reçu le: | 2007-05-03 |
| Projet: | Pierre concassée 5-20mm(essais et analyses 2007) | Provenance: | Graymont (Qc) inc., Marbleton |
| | | Localisation: | Prélèvement au banc |
| Site: | | Essai(s) complété(s) le: | 2007-06-05 |

| ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (LC 21-040) | | | | MASSE VOLUMIQUE ESSAI PROCTOR (CAN/BNQ 2501-250/255) | | | | | |
|--|----------------|------------------------------|-----|---|------------------|------------------|--|------------------|------------------|
| Tamis (mm) | Passant (%) | Spécifications (min. - max.) | | Proctor: | Méthode: | Marceau: | Préparation: | | |
| 112 | 100 | | | Masse volumique sèche maximale (kg/m ³): | | Retenu 20mm (%): | | | |
| 80 | 100 | | | Teneur en eau optimale (%): | | Retenu 5mm (%): | | | |
| 58 | 100 | | | PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES | | | | | |
| 40 | 100 | | | | | | | | |
| 31,5 | 100 | 100 | 100 | Analyses | Résultats | Exigences | Analyses | Résultats | Exigences |
| 20 | 100 | 85 | 100 | Densité, absorptivité A23.2-12A | | | Bleu de Méthylène | | |
| 14 | 90 | 60 | 90 | Densité relative brute | 2,708 | | Matière organique (%) LC 31-229 | | |
| 10 | 48 | 25 | 80 | Densité relative S.S.S. | 2,716 | | Masse volumique tassée (kg/m ³) | 1568,6 | |
| 5 | 5 | 0 | 10 | Densité apparente | 2,729 | | A23.2-10A | 1428,7 | |
| 2,5 | 1 | 0 | 5 | Absorptivité (%) | 0,28 | | Masse vol. non-tassée (kg/m ³) | | |
| 1,25 | 1 | | | Attrition Micro-Deval (%) | 18,8 | | A23.2-10A | | |
| 0,830 | 1 | | | CSA A23.2-20 grade | | | Teneur en eau (%) | | |
| 0,315 | 1 | | | Abrasion Los Angeles (%) | 22,9 | | BNQ 2501-170 / 2500-200 | | |
| 0,160 | 1 | | | A23.2-10A grade C | | | MGSO4 | 3,17 | |
| 0,080 | 0,7 | 0,0 | 1,0 | Micro Deval + LA (%) | 41,4 | | A23.2-9A | | |
| Module de finesse: 5,91 | | | | Coeff. de friabilité LC 21-050 | | | Mottes argile (%) | 0,27 | |
| Cc: 0,933 | % pierre: 95,1 | | | Particules fracturées (%) LC 21-150 | 100,0 | | A23.2-3A | | |
| Cu: 2,028 | % sable: 4,2 | | | Coeff. d'écoulement LC 21-075 | | | Particules légères (%) | 0,00 | |
| | % silt: 0,7 | | | Indice colorimétrique | | | A23.2-4A | | |
| Legende: * non-conformité | | | | | | | | | |

Remarques: Micro-Deval (LC 21-070): 13,1% Los-Angeles (LC 28-400): 22,7%
% de particules plates (LC 21-265): 23,0%, % de particules allongées (LC 21-265): 33,7%
Constituants: Calcaire dur (57,1%), calcaire avec veines et/ou nodules de calcite (9,7%), calcaire légèrement altéré (4,2%).
Résistance au gel et dégel des granulats grossiers non confinés (CSA A23.2-24A) = 10,38

Vénié par: Sylvie Daigle, tech., Chef Labo. 2007-08-05
Approuvé par: Yanik Marcotte, ing. 2007-08-05

Notes: Le résultat s'applique exclusivement à l'échantillon analysé.
Ce rapport ne doit être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite de Labo S.M. inc.



**DJL****RAPPORT D'ANALYSE DE GRANULATS**

Laboratoire : Bel Horizon, Canton de Hatley

904

Téléphone: (819) 568-5923

Télécopieur: (819) 564-0458

Provenance : banc Côte
 Localisation : St-François-Xavier
 Type de granulat : sable

Calibre : classe 0 - 5 mm
 Usage : divers
 Éch. : Date: Juin 2007

| GRANULOMETRIE (LC-21-040) | | | | | |
|-----------------------------------|------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|
| TAMIS mm | % PASSANT cumulé | EXIGENCES | TAMIS mm | % PASSANT cumulé | EXIGENCES MTO 2101 |
| 112 | | | 10 | 100 | 100 |
| 80 | | | 8 | | |
| 56 | | | 6.3 | | |
| 40 | | | 5 | 98 | 85 - 99 |
| 31.5 | | | 3.15 | | |
| 28 | | | 2.5 | 85 | |
| 25 | | | 1.25 | 71 | |
| 20 | | | 0.630 | 55 | |
| 16 | | | 0.315 | 25 | |
| 14 | | | 0.160 | 6 | |
| 12.5 | | | 0.080 | | |
| Module de finesse (BNQ 1809-114): | | 2,60 | Propreté (CSA A23.2 - 5A): | | 1,7 |

Dépouillé au laser granulométrique

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MECANIQUES

| DESCRIPTION | METHODES D'ESSAIS | RESULTATS | EXIGENCES | EFFECTUÉ PAR | DATE |
|--|-------------------|-----------|-----------|----------------|---------|
| CARACTÉRISTIQUES INTRINSEQUES | | | | | |
| Micro-Deval (Gros granulats) | LC 21-070 | | | | |
| Abrasion Los Angeles | LC 21-400 | | | | |
| Règle de compensation (MD + LA) | | | | | |
| Micro-Deval (Granulats Fins) | LC 21-101 | 27,5% | | DJL Sherbrooke | 2007 |
| Indice de Friabilité | LC 21-090 | 29,0% | | DJL Sherbrooke | 2007 |
| CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION | | | | | |
| % Fragmentation | LC 21-100 | | | | |
| % Particules Plates | LC 21-265 | | | | |
| % Particules Allongées | LC 21-265 | | | | |
| Coefficient d'écoulement | LC 21-075 | | | | |
| CARACTÉRISTIQUES COMPLÉMENTAIRES | | | | | |
| Absorption en eau (%) | CSA A23.2-8A | 0,86% | | DJL Sherb. | 2006 |
| Coefficient Polissage Projection (CPP) | LC 21-102 | | | | |
| Indice colorimétrique | CSA A23.2-7A | 1 | | DJL Sherb. | 2007 |
| Densité relative (app) | CSA A23.2-6A | 2,706 | | DJL Sherb. | 2006 |
| Densité relative (acc) | CSA A23.2-6A | 2,637 | | DJL Sherb. | 2006 |
| Densité relative (sss) | CSA A23.2-6A | 2,667 | | DJL Sherb. | 2006 |
| Durabilité MgSO ₄ | CSA A23.2-9A | 6,54% | | Labo SM | 2006 |
| Masse non-tassée | BNQ 2560-060 | | | | |
| Masse tassée | CSA A23.2 - 10A | 1801* | | DJL Sherb. | 2007 |
| Matières organiques | LC 31-228 | | | | |
| Mottes d'argile et particules friables | CSA A23.2 - 3A | 0,1% | | DJL Sherb. | 2006 |
| Nombre pétrographique | BNQ 2580-900 | | | | |
| Particules tétraèdres | CSA A23.2-4A | 0,04% | | Labo SM | 2006 |
| Proctor modifié | BNQ 2501-255 | | | | |
| Réact. alcalis-granulat (prisme: 1 an) | CSA A23.2-14A | 0,020 | | LVM-Fondatoc | 2004-05 |
| Réact. alcalis-granulat (mortier: 14 j.) | CSA A23.2-25A | | | | |
| Valeur au bleu | LC 21-255 | | | | |
| Teneur particules inférieures à 6µm | NQ 2501-025 | | | | |
| Potentiel de gonflement pyrite | CTQ-M100 | | | | |

REMARQUE : * : masse tassée effectuée sur du sable sec.

Préparé par: Michel Laperle

Approuvé

Michel Laperle, resp. tech.

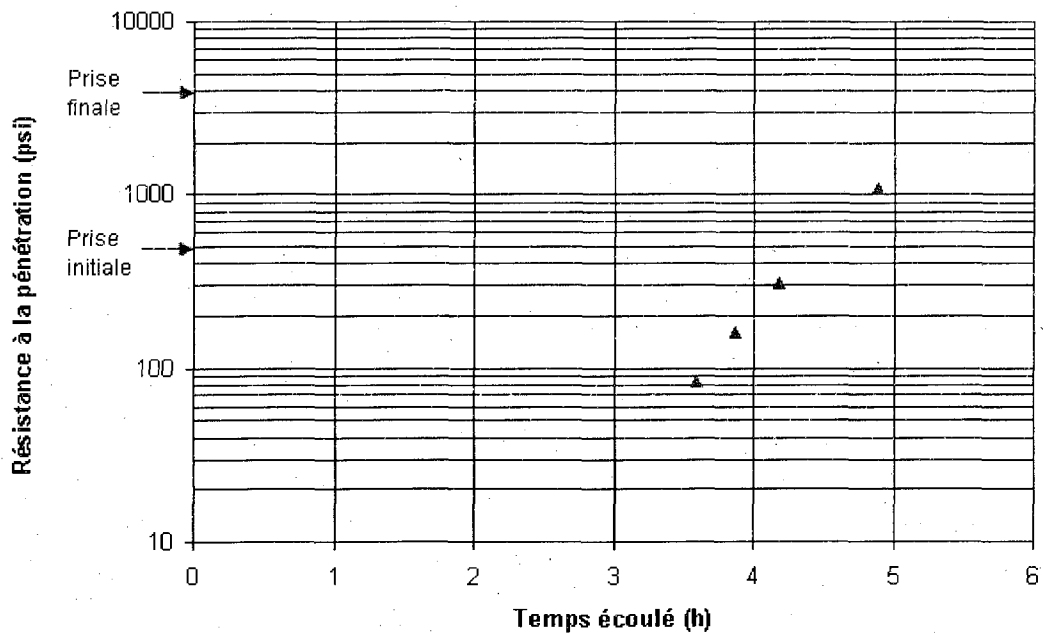
P3-10 .xlt (Révisé: 02-2002)

Annexe B

Exemple de mesure du temps de prise initial

Essai de pénétration (ASTM C-403)

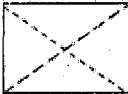
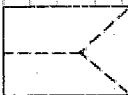
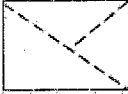
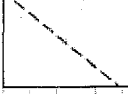
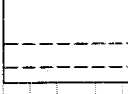
| | | Date | | | Mélange | | | | |
|-----------------|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---|------|--|
| | | Heure de départ | 08:57 | | LE07-25AE50adj.2 | | | | |
| Ciment | Type | | | Pierre | | | | | |
| | Quantité | | | | | | | | |
| Sable | Humidité | | | Réducteur d'eau | | | | | |
| | Quantité | | | Entraîneur d'air | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Heure | | Temps écoulé (h) | | | | | | | |
| 1 | 2 | 1 | 2 | Moy. | | | | | |
| 12:33 | | 3,60 | | 3,60 | | | | | |
| 12:49 | | 3,87 | | 3,87 | | | | | |
| 13:08 | | 4,18 | | 4,18 | | | | | |
| 13:50 | | 4,88 | | 4,88 | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Résistance (lb) | | Aiguille | Résistance (psi) | | | Température (°C) | | | |
| 1 | 2 | Moy. | 1 | 2 | Moy. | 1 | 2 | Moy. | |
| 84 | 85 | 84,5 | 1 | 84 | 85 | 84,5 | | | |
| 72 | 88 | 80 | 1/2 | 144 | 176 | 160 | | | |
| 72 | 82 | 77 | 1/4 | 288 | 328 | 308 | | | |
| 115 | 100 | 107,5 | 1/10 | 1150 | 1000 | 1075 | | | |
| | | | | 1/20 | | | | | |
| | | | | 1/40 | | | | | |



Annexe C

Exemple de mesure de la résistance à la compression

MESURE DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION DU BÉTON

| PROJET : | | 25SAE75 | | DATE : | | 2007-05-30 | | TECH. : | | D-128 | | |
|-------------------|--------|---|-------|---|--------------|---|---------|---|--------------|---|---------|-----------------|
| Identification | éch. # | âge du béton | lbs. | newton | hauteur (mm) | diamètre (mm) | rapport | facteur | surface (mm) | mpa | moyenne | type de rupture |
| LÉ07 | 1 | 1d | 20000 | 88960 | 204 | 103 | 1,98 | 0,9980 | 8332,31 | 10,66 | 10,83 | d |
| 25SAE | 2 | 1d | 21000 | 93408 | 200 | 104 | 1,92 | 0,9933 | 8494,89 | 10,92 | | d |
| 75000ppm | 3 | 1d | 20500 | 91184 | 203 | 103 | 1,97 | 0,9972 | 8332,31 | 10,91 | | d |
| LÉ07 | 1 | 7d | 36000 | 160128 | 202 | 103 | 1,96 | 0,9964 | 8332,31 | 19,15 | 19,46 | d |
| 25SAE | 2 | 7d | 36500 | 162362 | 202 | 104 | 1,94 | 0,9949 | 8494,89 | 19,01 | | d |
| 75000ppm | 3 | 7d | 38000 | 169024 | 202 | 103 | 1,96 | 0,9964 | 8332,31 | 20,21 | | d |
| LÉ07 | 1 | 28d | 51000 | 226848 | 196 | 102 | 1,92 | 0,9932 | 8171,30 | 27,57 | 27,62 | d |
| 25SAE | 2 | 28d | 51000 | 226848 | 199 | 102 | 1,95 | 0,9956 | 8171,30 | 27,64 | | d |
| 75000ppm | 3 | 28d | 50000 | 222400 | 198 | 101 | 1,96 | 0,9963 | 8011,87 | 27,66 | | d |
| | 1 | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | |
| Type de rupture : | | | | | | | | | | | | |
| | |  | |  | |  | |  | |  | | |
| | | (A) | | (B) | | (C) | | (D) | | (E) | | |

Annexe D

Calcul du rapport E / L — Essai au micro-onde

Exemple de calcul du rapport E/L – Essai au micro-onde Béton de 30 MPa sans air entraîné

Masse plat = 1 037,2 g

Masse du béton frais = 1 500 g

Masse plat + masse béton frais = 2 537,2 g

Masse plat + masse béton (10 minutes) = 2 436,6 g

Masse plat + masse béton (12 minutes) = 2 423,1 g

Masse plat + masse béton (14 minutes) = 2 418,0 g

Masse plat + masse béton (16 minutes) = 2 416,5 g

Masse plat + masse béton (18 minutes) = 2 415,6 g

Masse volumique du béton frais = 2 347,0 kg / m³

Formulation du béton :

Ciment = 295 kg / m³

Pierre = 935 kg / m³

Sable = 960 kg / m³

Quantité d'eau dans le béton apportée par la pierre :

$935 \text{ kg / m}^3 \times 0,8 \% = 4,67 \text{ kg d'eau / m}^3$ (où 0,8 % est la teneur en de la pierre)

Quantité d'eau dans le béton apportée par le sable :

$960 \text{ kg / m}^3 \times 0,5 \% = 7,68 \text{ kg d'eau / m}^3$ (où 0,5 % est la teneur en eau du sable)

Pourcentage d'eau dans le béton (WC) :

$$WC = \frac{100 \times (2537,2 - 2415,6)}{1500} = 8,11\%$$

Quantité d'eau totale dans le béton (WT) :

$$WT = \frac{WC \times 2347,0}{100} = 190,26 \text{ kg d'eau / m}^3$$

Quantité d'eau ajoutée au béton :

$190,26 \text{ kg} - 4,67 \text{ kg} - 7,68 \text{ kg} = 177,91 \text{ kg d'eau / m}^3$

Rapport E/L :

$$\frac{177,91 \text{ kg / m}^3}{295,00 \text{ kg / m}^3} = 0,60$$

Annexe E

Exemple de calcul des proportions d'eau recyclée par mélange

DÉTERMINATION DE LA QUANTITÉ D'EAU RECYCLÉE

Date : 24-juil-07
 Béton : 30-SAE-75

Mélange final à 75000 ppm

Analyse de l'eau recyclée

| Bécher | 1 | 2 |
|-------------------------|---------|----------|
| M. bécher (g) | 368,4 | 311,1 |
| Vol. eau (ml) | 480 | 480 |
| M. bécher + liquide (g) | 867,3 | 815,2 |
| M. bécher + solide (g) | 420,6 | 364,4 |
| ppm | 0,10875 | 0,111042 |

Moyenne des ppm 109896 ppm

Quantités connues et fixes selon formulation

Ciment 18,28 kg
 Pierre 59,55 kg
 Sable 60,30 kg
 Eau 11,87 l

Détermination des quantités

Obtenir une concentration finale de 75000 ppm \pm 1000 avec une eau recyclée à 109896 ppm

Surplus pour obtenir la concentration désirée : 6000 ppm

Quantité de solide dans l'eau : 961470 mg
 0,961 kg

Quantité d'eau recyclée (incluant les solides) : 8,75 l

Quantités finales :

Eau de l'aqueduc 4,08 l
 Eau recyclée 7,79 l
 Sable 59,34 kg

Vérification de la concentration en ppm

La concentration réelle sera équivalente à 74931 ppm

Rapports E/C

E/C réel 0,65
 E/C apparent 0,70

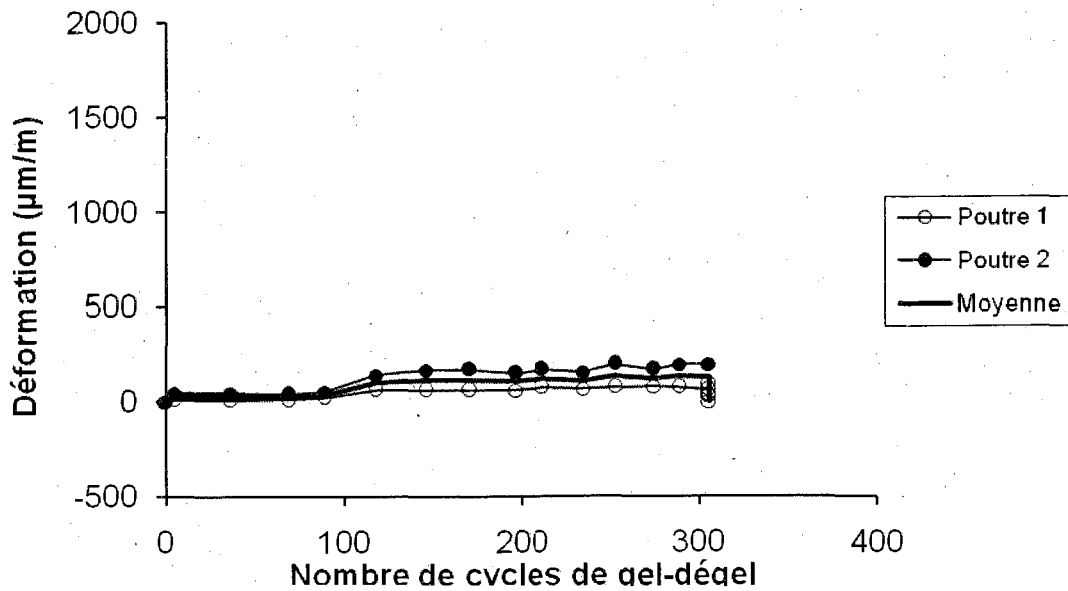
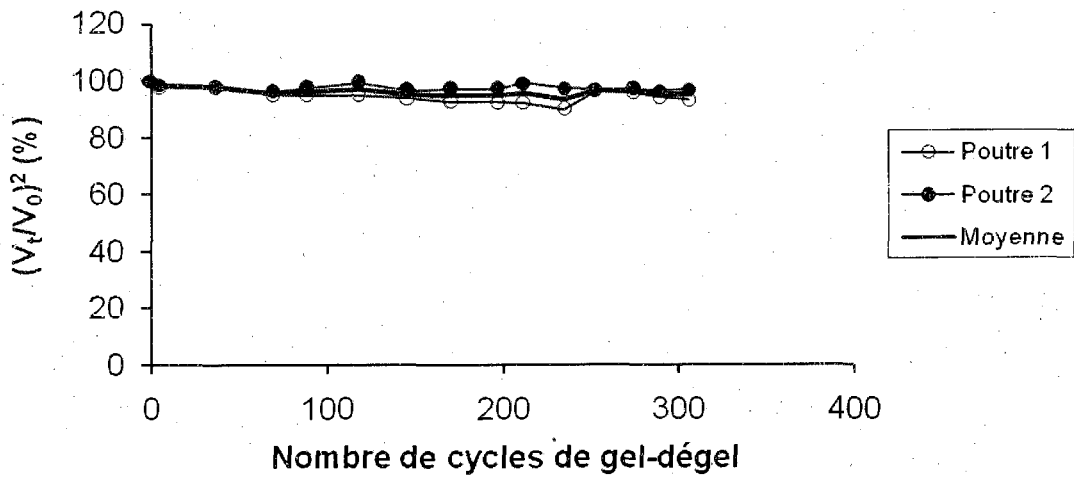
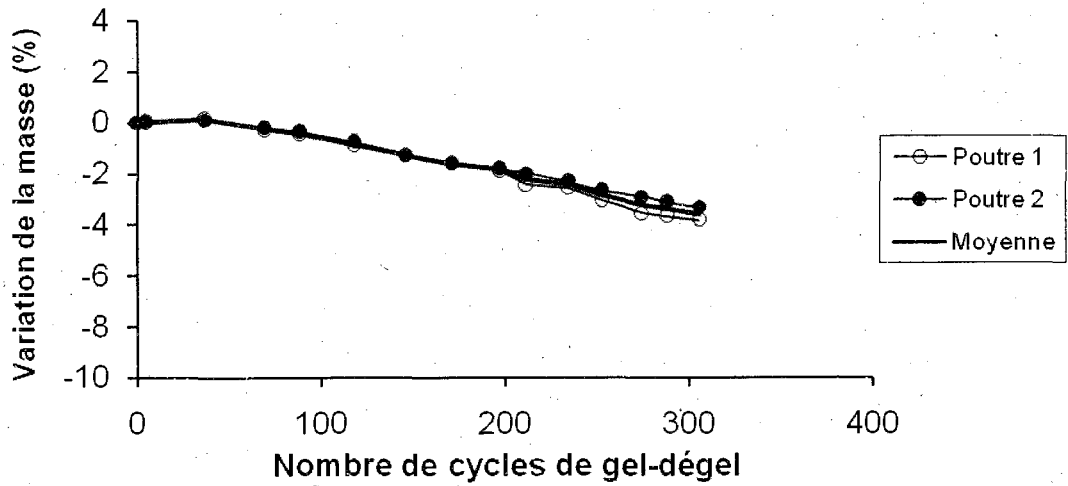
Annexe F

Résistance aux cycles de gel – dégel des bétons

**Résultats après 300 cycles de gel - dégel des bétons fabriqués en
laboratoire -
35 MPa avec air entraîné**

| Bétons | Variation de la masse (%) | $(V_t/V_0)^2$ (%) | Déformation ($\mu\text{m/m}$) |
|--------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 0 ppm | -3,6 | 95 | 130 |
| 50 000 ppm A | -4,9 | 99 | 68 |
| 50 000 ppm B | -2,9 | 84 | 20 |
| 50 000 ppm D | -4,3 | 96 | 94 |
| 50 000 ppm E | -3,1 | 91 | 2 |

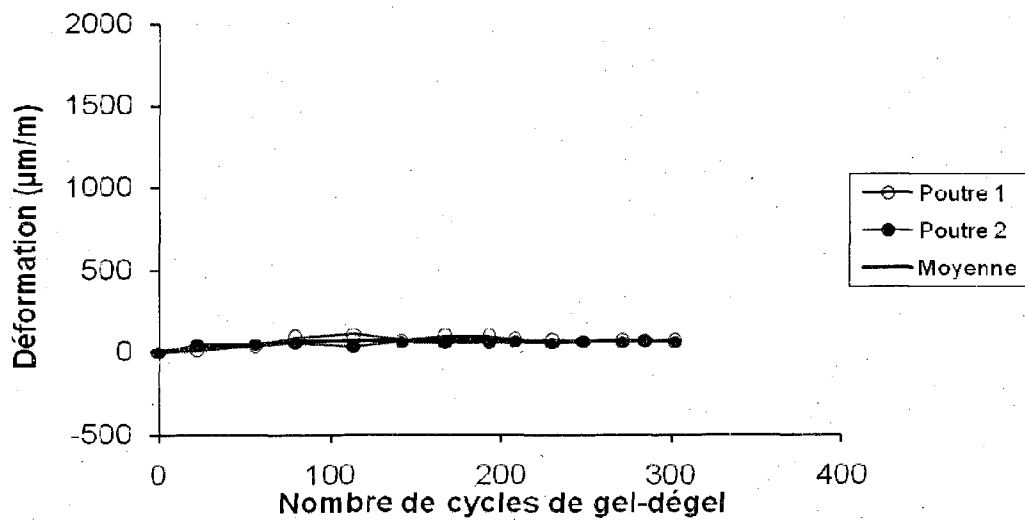
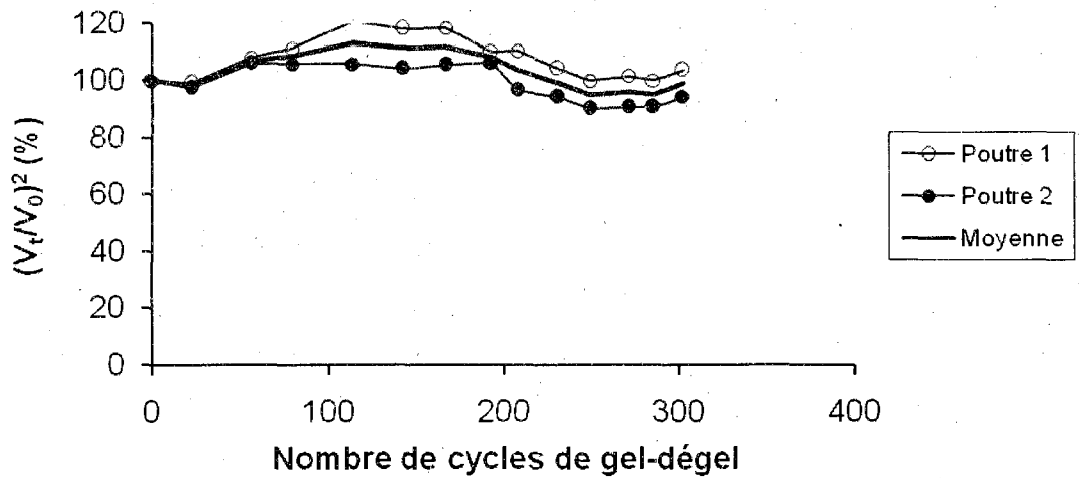
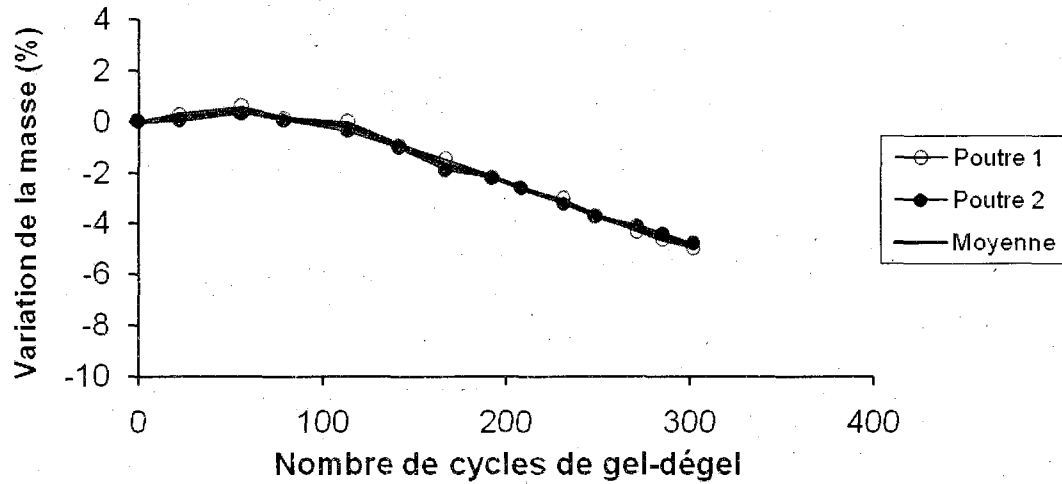
Identification du béton : 35 AE 0
 No du projet : 07-040
 Date de fabrication du 31 juillet



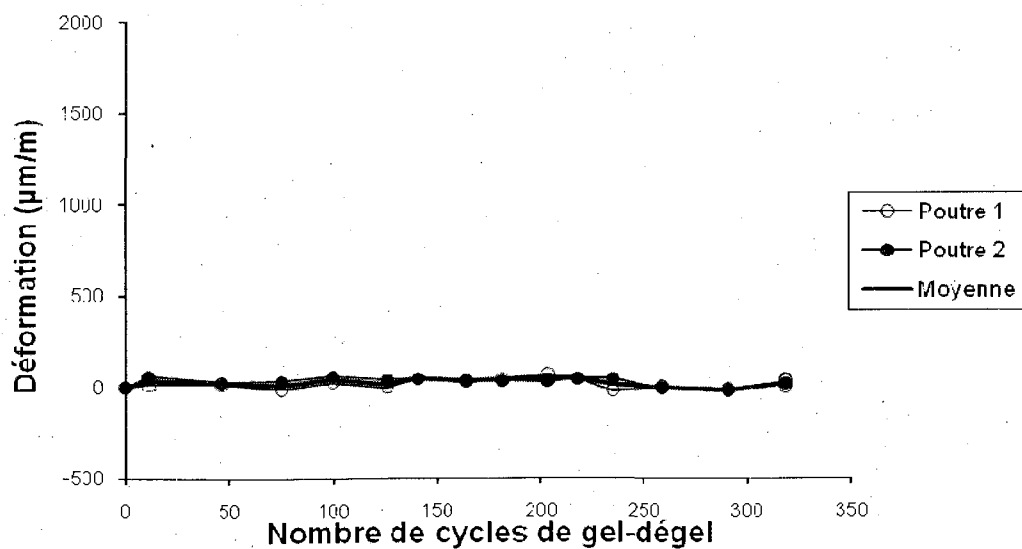
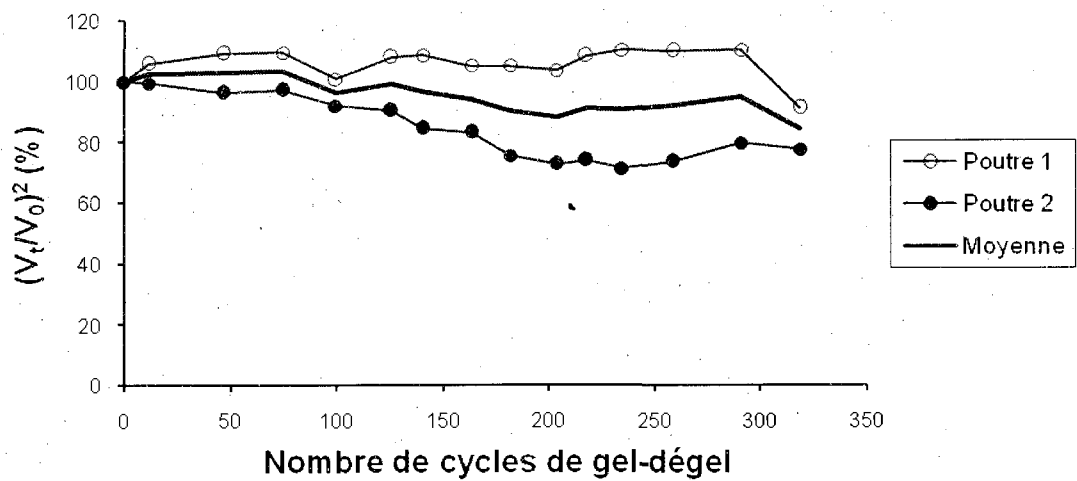
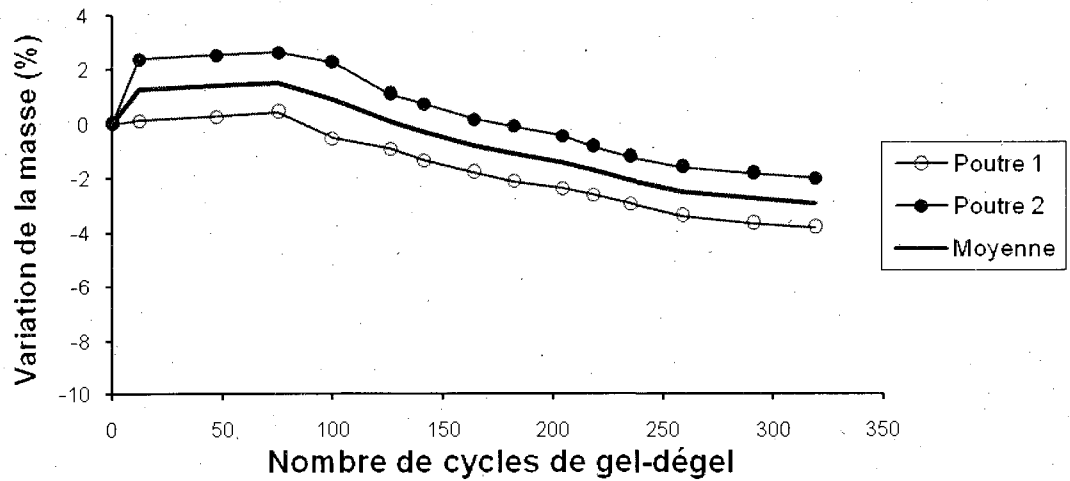
Identification du béton : 35 AE 50 A

No du projet : 07-044

Date de fabrication du
béton : 2 août 2007



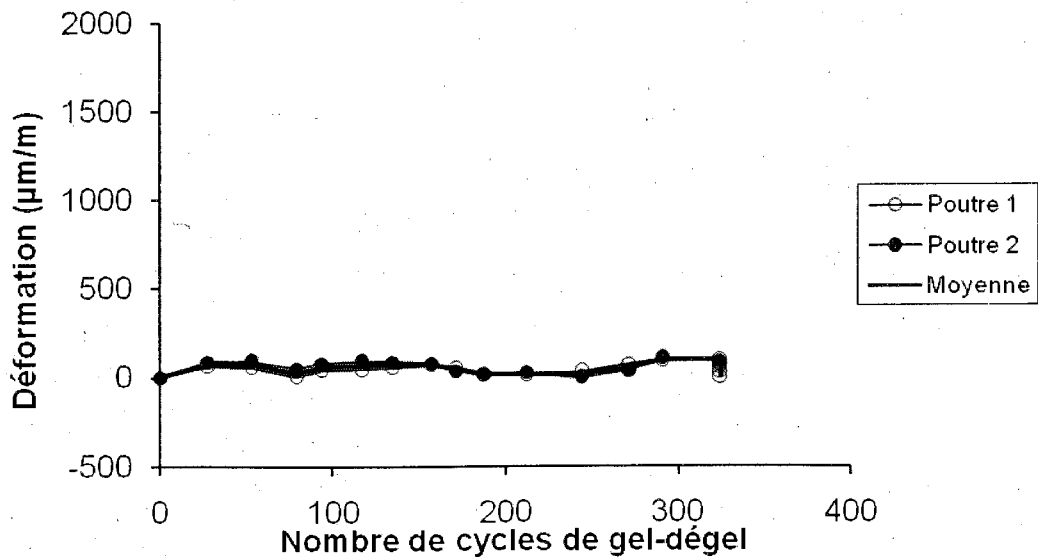
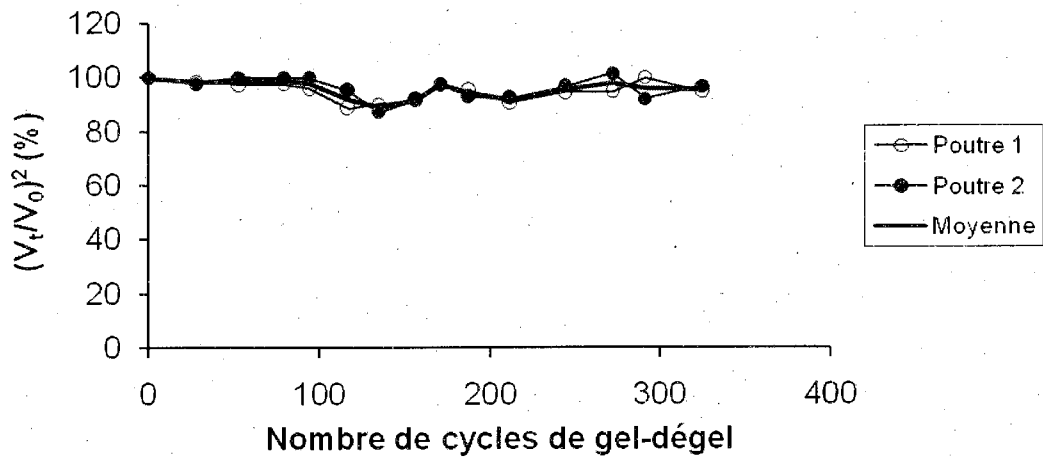
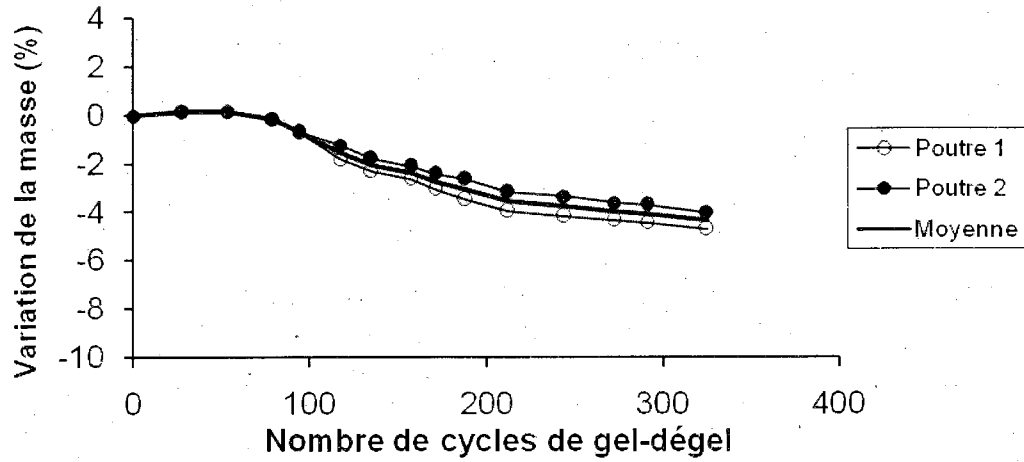
Identification du béton : **35 AE 50 B**
 No du projet : **07-045**
 Date de fabrication du
 béton : **15 août 2007**



Identification du béton : **35 AE 50 D**

No du projet : **07-037**

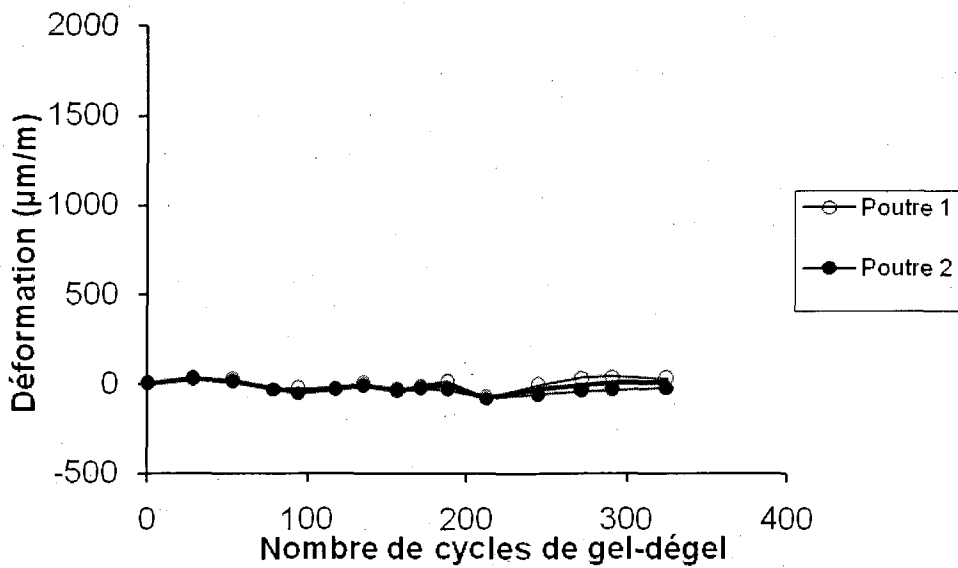
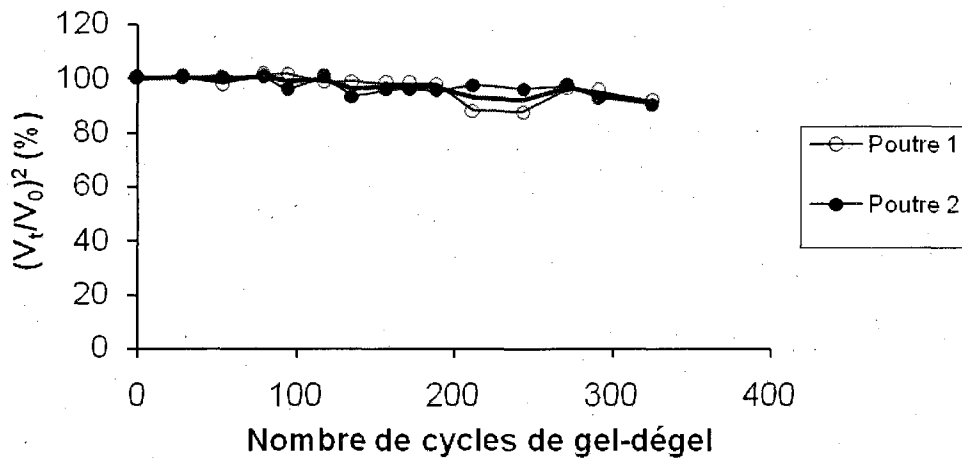
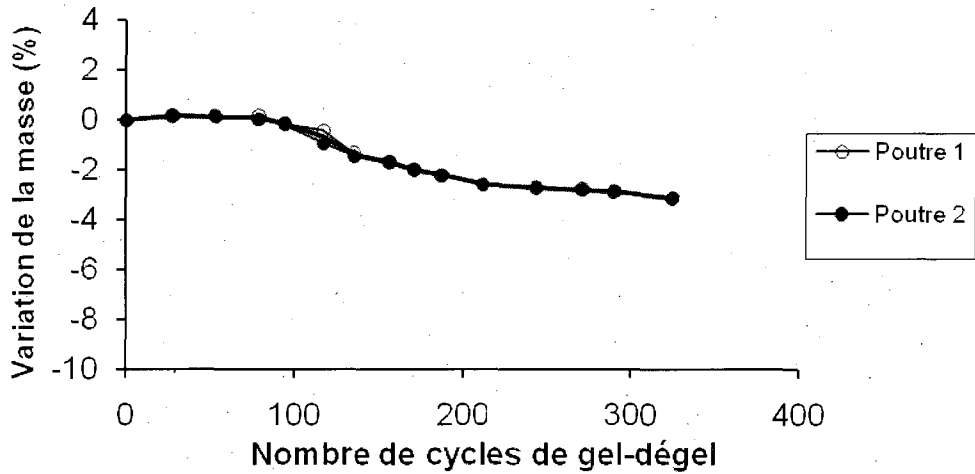
Date de fabrication du



Identification du béton : 35 AE 50 E

No du projet : 07-041

Date de fabrication du



**Résultats après 300 cycles de gel - dégel des bétons fabriqués en
usine -
35 MPa avec air entraîné**

| Bétons | Variation de la masse (%) | $(V_t/V_0)^2$ (%) | Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$) |
|---------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 0 ppm | -2,4 | 93 | 150 |
| 46 000 ppm | -2,0 | 96 | 130 |
| 54 000 ppm A | -2,4 | 96 | 126 |
| 107 000 ppm A | -2,4 | 92 | 178 |

Identification du béton : **U 35 AE 0**
 No du projet : **08-020**
 Date de fabrication du béton : **15 mai 2008**

