



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie civil

**UTILISATION DES EAUX USÉES DANS LE BÉTON PRÊT À L'EMPLOI
D'UN RECYCLEUR À BÉTON RA20 DE DEMIX BÉTON
SITUÉ À VILLE LASALLE**

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées

Spécialité : génie civil

Composition du jury

Richard Gagné

Arezki Tagnit-Hamou

Patrice Rivard

François Lemaire

Stéphanie Constance BLANCHARD

Sherbrooke (Québec), Canada

août 2008

TV-1889



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-49459-2
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-49459-2

NOTICE:

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

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

AVIS:

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

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

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

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

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

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


Canada

Remerciements

J'aimerais d'abord exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de recherche, monsieur Richard Gagné ing. Ph.D, pour la confiance qu'il m'a témoignée, toute l'autonomie dont j'ai pu bénéficier ainsi que sa grande souplesse vis-à-vis les événements, grands et petits, survenus durant mes études.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel du Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke pour l'aide technique qu'il m'a apporté lors de l'accomplissement de ce mémoire. Je remercie spécialement monsieur Jean-Yves Roy et madame Ghislaine Luc pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et pour leurs collaborations.

J'adresse une attention toute particulière à ma famille, Denise et Yvon Blanchard ainsi qu'à Emmanuel Baril, qui m'ont soutenue et encouragée durant mes études universitaires. Je remercie également Ginette Blanchard pour son implication lors de la correction de ce mémoire. Un gros câlin à mon petit garçon, Jacob Baril, qui a vu le jour durant ces travaux de recherche.

Enfin, je voudrais remercier Ciment St-Laurent, Euclid Canada, Transport Québec ainsi que le CRSNG pour leur participation financière lors de la réalisation de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Dans l'industrie du béton, le terme « eau grise » (*gray water*) englobe les eaux de lavage des toupies des camions malaxeurs et les eaux de lavage utilisées dans les stations de recyclage du béton frais. Seules les eaux grises peuvent, sous certaines conditions, être utilisées pour le gâchage des bétons. Les eaux grises sont produites à l'aide d'équipements spéciaux (recycleur à bétons, bassin de décantation) permettant d'entreposer, de diluer et de contrôler la température des eaux grises. L'eau grise, aussi appelée eau recyclée, doit également respecter certaines exigences normatives portant sur la teneur en chlorures, en sulfates et en matières solides en suspension.

Cette recherche vise à mieux comprendre les effets de l'eau recyclée sur certaines propriétés des bétons frais et durcis. Le programme de recherche comporte des essais en laboratoire et des essais de production en usine. Les essais en laboratoire visent à comprendre et à quantifier l'influence de la teneur en eau recyclée sur les propriétés des bétons frais et durcis. Les essais en usine visent à évaluer la validité des conclusions dégagées de l'étude en laboratoire à partir de quatre types de bétons produits commercialement.

Les résultats montrent que l'utilisation d'eau recyclée, en remplacement d'une partie de l'eau potable utilisée pour gâchage, engendre systématiquement une diminution du volume d'air entraîné et du temps de prise. Dans certaines conditions, l'eau recyclée peut aussi provoquer une forte chute de l'affaissement. Les résistances à la compression sont relativement affectées en raison du rapport eau/liant réel plus faible des bétons avec eau recyclée. Et finalement, la baisse du volume d'air entraîné peut compromettre la résistance à l'écaillage des bétons contenant de l'eau recyclée.

Mots Clés :

Eau recyclée
Eau grise
Eau de Lavage
Béton

Table des matières

1	MISE EN CONTEXTE	1
2	REVUE DE LA DOCUMENTATION TECHNIQUE	5
2.1	Introduction.....	5
2.1.1	Vision environnementale.....	5
2.1.2	Recyclage du béton frais.....	6
2.1.3	Les avantages et les inconvénients	7
2.2	Technologie du recyclage.....	8
2.2.1	Les différents appareils.....	8
2.2.2	Production contenant de l'eau recyclée	10
2.2.3	Composition de l'eau recyclée	11
2.3	Les normes.....	11
2.4	Caractéristiques physico-chimiques des bétons contenant des eaux recyclées	12
2.5	Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton frais.....	14
2.5.1	Température	14
2.5.2	Affaissement et mise en place	15
2.5.3	Temps de prise	15
2.5.4	Caractéristiques du réseau de bulles d'air	16
	2.5.4.1 L'effet des particules fines sur la porosité	16
	2.5.4.2 L'effet des alcalis sur le réseau de bulles d'air.....	16
2.6	Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton durci.....	17
2.6.1	Résistance à la compression	17
2.6.2	Retrait de séchage.....	18
2.6.3	Durabilité.....	18
3	BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS.....	19
3.1	Exposé de la problématique	19
3.2	Objectifs spécifiques	20
3.3	Méthodologie.....	21
3.3.1	Phase 1 – Caractéristiques physico-chimiques des eaux recyclées	22
3.3.2	Phase 2 – Influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons fabriqués en laboratoire.....	23
3.3.3	Phase 3 – Influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons fabriqués en usine	25
4	MATÉRIAUX, MÉLANGES ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES ...	26
4.1	Matériaux.....	26
4.1.1	Eau.....	26
4.1.2	Ciment.....	27
4.1.3	Granulats	28
	4.1.3.1 Granulat fin	28
	4.1.3.2 Gros granulat	30

4.1.4	Adjuvants	31
4.2	Mélanges.....	32
4.2.1	Bétons en laboratoire	32
4.2.2	Bétons d'usine.....	36
4.3	Procédures expérimentales.....	39
4.3.1	Procédures d'essais en laboratoire	39
4.3.2	Procédures d'essais en usine.....	42
5	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	42
5.1	Phase 1 – Caractérisation physico-chimique des eaux recyclées	42
5.1.1	Mesures en continu à l'intérieur du bassin d'agitation à l'usine .	42
5.1.2	Analyse chimique de l'eau recyclée à partir d'échantillons ponctuels.....	44
5.1.3	Analyse physico-chimique des solides en suspension	45
5.1.3.1	Diffraction des rayons X.....	45
5.1.3.2	Granulométrie laser	48
5.1.3.3	Fluorescence X.....	48
5.2	Phase 2 – Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en laboratoire	50
5.2.1	Effets combinés	50
5.2.1.1	Propriétés des bétons frais et durcis.....	50
5.2.1.2	Caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton durci.....	51
5.2.1.3	Durabilité au gel.....	52
5.2.2	Effets séparés.....	53
5.2.2.1	Effet des ions en suspension dans l'eau de gâchage	53
5.2.2.2	Effet des solides en suspension dans l'eau de gâchage	54
5.3	Phase 3 – Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en usine.....	54
6	DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	57
6.1	Phase 1 – Caractérisation physico-chimique des eaux recyclées	57
6.2	Phase 2 – Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en laboratoire	60
6.2.1	Effets combinés	60
6.2.1.1	Affaissement.....	60
6.2.1.2	Temps de prise	61
6.2.1.3	Teneur en air du béton frais.....	62
6.2.1.4	Résistance à la compression	63
6.2.1.5	Réseau des bulles d'air du béton durci.....	65
6.2.1.6	Durabilité à l'écaillage	69
6.2.1.7	Durabilité au gel.....	70
6.2.1.8	Synthèse.....	70
6.2.2	Effets séparés	71

6.2.2.1	Effets des ions en suspension dans l'eau de gâchage	71
6.2.2.1.1	Affaissement	71
6.2.2.1.2	Temps de prise	73
6.2.2.1.3	Résistance à la compression	74
6.2.2.2	Effets des solides en suspension dans l'eau de gâchage	75
6.2.2.2.1	Affaissement	75
6.2.2.2.2	Temps de prise	76
6.2.2.2.3	Teneur en air du béton frais	76
6.2.2.2.4	Résistance à la compression	77
6.2.2.3	Synthèse	78
6.3	Phase 3 – Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en usine	79
6.3.1	Bétons frais	79
6.3.2	Bétons durcis	85
6.3.3	Synthèse	88
7	CONCLUSION	89
	BIBLIOGRAPHIE	93
	ANNEXE A : Calcul des ppm et de la densité	95
	ANNEXE B : Rapport d'analyse sur l'eau recyclée	97
	ANNEXE C : Certificats de ciment et fiches techniques des adjuvants ..	114
	ANNEXE D : Fiches techniques des bétons fabriqués en chantier	122
	ANNEXE E : Résultats des essais de gel-dégel et écaillage en laboratoire	153
	ANNEXE F : Résultats des essais de gel-dégel et écaillage en chantier	160

1 MISE EN CONTEXTE

Les producteurs de bétons prêts à l'emploi doivent s'engager à fournir des bétons conformes aux exigences des devis imposés par les propriétaires d'ouvrages. Les exigences portent habituellement sur la maniabilité du béton frais, sur les caractéristiques mécaniques à court et à long terme et sur la durabilité du béton durci.

Certains critères de conformité de la maniabilité (affaissement, étalement, pompabilité, etc.) et de la durabilité des bétons frais (volume d'air du béton frais) peuvent être mesurés à l'usine ou au chantier. Cette étape du système de contrôle de la qualité du producteur ou du propriétaire de l'ouvrage permet d'identifier les livraisons de béton non conforme avant la mise en place du béton. Les livraisons de béton non conforme sont généralement prises en charge par le producteur qui rappelle le camion à l'usine, puis qui dispose du béton à sa convenance. Au Québec, les bétons non conformes sont souvent utilisés pour produire de gros blocs (environ 1 m³) utilisés pour différents types d'applications (murs de protection, murs de soutènement, travaux temporaire de signalisation, etc.). Ces blocs sont généralement vendus à faible prix en raison d'une offre importante et d'une faible demande. Pour le producteur, la marge bénéficiaire de ce type de produit est souvent nulle et parfois déficitaire.

La prise en charge des bétons non conformes engendre aussi des coûts liés à la gestion des eaux de lavage des camions retournés à l'usine. En effet, après le déchargement du béton non conforme, la toupie et la dalle de la bétonnière doivent être rincées pour éliminer tous les résidus de béton (pâte de ciment, granulats, adjuvants chimiques). Les bétonnières vides, de retour à l'usine après une livraison normale, doivent aussi être lavées de la même manière. Ces opérations génèrent une grande quantité d'eaux de lavage qui ne peuvent pas être rejetées directement dans l'environnement ou dans les systèmes d'égouts municipaux. Le producteur doit donc prévoir un système de récupération et de traitement de ces eaux (plateforme de lavage, caniveaux, bassins de décantation) qui permettra de réutiliser l'eau de lavage pour ses opérations de production ou d'en disposer conformément aux lois environnementales.

Les exigences environnementales de plus en plus sévères et les coûts grandissants d'élimination ou d'entreposage des résidus de lavage ont poussé les entreprises à faire preuve d'imagination afin de recycler ces résidus, tout en offrant un produit de qualité à un prix concurrentiel. Une des approches actuellement utilisées consiste à recycler tous les matériaux et les résidus associés au lavage des camions et au retour des livraisons de béton non conforme. Cette pratique est relativement bien implantée en Europe. Elle est cependant beaucoup moins utilisée en Amérique du Nord, notamment au Canada et au Québec.

Certains fabricants d'équipements de production du béton prêt à l'emploi commercialisent de petites usines de recyclage du béton frais. Ces systèmes permettent de récupérer tous les matériaux (eau, sable et pierre) entrant dans la composition des bétons non conformes retournés chez le producteur de béton. Une usine de recyclage typique comporte une trémie dans laquelle la bétonnière vidange le béton non conforme. Une grande quantité d'eau est alors ajoutée au béton pour liquéfier le mélange et éventuellement séparer la pâte de ciment des granulats. Le lavage des granulats s'effectue dans un baril séparateur rotatif qui achemine les granulats lavés sur un convoyeur. L'eau de lessivage est récupérée dans un bassin agitateur de grande capacité (plus de 100 000 litres). Cette eau recyclée est utilisée comme eau de gâchage pour les opérations régulières de production du béton ou comme eau de lessivage des bétons non conformes. Les granulats lavés sont séparés par criblage en une fraction fine (<5 mm) et une fraction grossière (>5 mm).

Le bassin agitateur comporte des palmes qui agitent et homogénéisent constamment l'eau recyclée contenant les solides en suspension. L'installation peut aussi comporter des unités de refroidissement et de chauffage pour maintenir l'eau recyclée à une température adéquate pour le gâchage des bétons.

Les matières en suspension dans l'eau recyclée sont des particules fines d'origine minérales (<100 μm) apportées par les granulats et des particules fines constituées d'hydrates formés par l'hydratation du ciment. Un système automatisé ajoute, au besoin, de l'eau fraîche dans le bassin agitateur de manière à ce que la densité soit maintenue à l'intérieur de certaines limites minimale et maximale (typiquement 1,03 à

1,09). L'eau recyclée peut contenir des adjuvants chimiques (réducteur d'eau, entraîneur d'air) utilisés pour la production régulière des bétons. En général, les bétons non conformes contenant des chlorures, de forts dosages de superplastifiants, d'accélérateur et de retardateur de prise ne sont pas recyclés pour éviter la contamination de l'eau recyclée.

L'utilisation d'eau recyclée pour le gâchage des bétons fait l'objet de prescriptions spéciales des normes de l'Association canadienne de normalisation (CSA), du Bureau de normalisation du Québec (NQ) et de l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Ces normes autorisent, à certaines conditions, l'utilisation d'eaux recyclées ou d'eaux de lavage traitées pour la production de bétons en usine.

L'expérience pratique et les résultats de nombreuses études (voir chapitre 2) ont démontré que le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée pouvait modifier certaines propriétés des bétons frais (affaissement, temps de prise, ressuage, entraînement d'air) et durcis (résistance à la compression, retrait de séchage). Cependant, lorsque l'eau recyclée est utilisée conformément aux exigences des normes, les effets sur les propriétés des bétons conventionnels sont relativement faibles. Les bétons conventionnels gâchés avec de l'eau recyclée (qui respecte les normes) peuvent être produits et commercialisés sans aucune modification du dosage (eau, liants, adjuvant).

La compagnie *Demix Béton* a mis en opération une station de recyclage du béton frais à son usine de Ville LaSalle. Cette initiative est une des composantes majeures de la politique de développement durable de l'entreprise. C'est actuellement la première et la seule usine de recyclage du béton frais au Québec. L'usine comporte un bassin d'homogénéisation d'une capacité de 100 000 litres alimenté par un recycleur à béton de type RA-20 de la compagnie *Schwing*.

Au moment où les essais ont été effectués, la station de recyclage n'était pas exploitée à son plein potentiel. La compagnie souhaitait implanter graduellement cette nouvelle technologie. Cette approche facilitera la formation du personnel et permettra d'adapter les systèmes de production et de qualité de l'entreprise. En ce moment, seuls les bétons non conformes peu adjuvantés sont recyclés. Ce choix vise à limiter

la charge en adjuvant dans l'eau recyclée. De plus, l'eau recyclée n'était utilisée que pour le gâchage de bétons sans air entraîné (20 – 30 MPa) car on ne connaissait pas encore l'influence de l'eau recyclée sur la durabilité au gel du béton et sur la production et la stabilité du réseau de bulles d'air entraîné. Avant de généraliser le recyclage de tous les types de béton non conforme et d'autoriser l'utilisation d'eau recyclée dans tous les types de bétons, la Compagnie *Demix Béton* souhaitait comprendre et quantifier précisément les effets de l'eau recyclée sur la durabilité et les propriétés du béton frais et durci. Cette recherche vise à mettre en évidence ces effets.

2 REVUE DE LA DOCUMENTATION TECHNIQUE

2.1 Introduction

2.1.1 Vision environnementale

Jusqu'à la fin des années 1970, la société en général s'est très peu préoccupée des impacts environnementaux engendrés par son développement, principalement en raison du peu de connaissances de la problématique. Au Québec, la prise de conscience des années 1980 a fait réaliser que le développement pouvait mettre en péril les ressources naturelles.

Ainsi, les préoccupations environnementales ont fortement suscité une réduction des rejets industriels et un développement des industries dans une perspective de développement durable. Des montants considérables doivent constamment être investis par les industries afin de prévenir, de réduire ou de supprimer les différentes sources industrielles de contaminant, telles que les eaux usées et les matières résiduelles.

Dans cette optique, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec a développé différentes stratégies d'intervention telles que le *Programme de réduction des rejets industriels (PRRI)* qui a vu le jour en 1998, la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008*, etc. Puisque le béton durci ne cause pas de risque pour l'environnement, sa valorisation est facilitée. Dans la mesure où il rencontre certains critères de qualité, il pourra être réutilisé comme matériau dans des projets de remblaiement, de réfection ou de construction.

Suite à une demande insuffisante pour des matériaux de remblai en béton concassé, l'industrie du béton a favorisé la fabrication de blocs de béton. Par contre, la vente de ceux-ci est très limitée puisque ce sont des matériaux qui ne sont pas contrôlés et dont les coûts de livraison sont très élevés par rapport au coût de production. L'industrie du béton se retrouve donc avec des inventaires considérables de blocs de béton non utilisés.

Une seconde problématique survient avec l'eau de lavage des bétonnières. En vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement*, l'article 20 stipule que « nul ne doit

émettre, déposer, dégager ou rejeter, ni permettre l'émission, le dépôt, le dégagement ou le rejet dans l'environnement d'un contaminant au-delà de la quantité ou de la concentration prévue par le règlement du gouvernement. » Conformément à cet article, il est impossible de rejeter les eaux de lavage dans l'environnement puisque le pH de l'eau et la quantité de matières en suspension (MES) sont au-dessus des normes gouvernementales.

Les normes municipales sont encore plus précises en matière de pH de l'eau et des MES. Les normes de la Ville de Montréal sont la référence de plusieurs villes au Québec. L'article 10 du règlement 87 de la Ville de Montréal, sur les rejets dans un réseau d'égout pluvial ou dans un cours d'eau, indique qu' « *il est interdit de rejeter, ou de permettre le rejet, dans un réseau d'égout unitaire ou domestique : ... un liquide ou une substance dont le pH est inférieur à 6,0 ou supérieur à 10,5, ou un liquide ou autre substance qui, de par sa nature, produira dans les canalisations d'égout un pH inférieur à 6,0 ou supérieur à 10,5 après dilution.* » Comme les eaux de lavage des bétonnières ont un pH de 12 à 12,7, il est strictement interdit de vidanger ces eaux dans le réseau d'égout unitaire ou domestique. Il est donc nécessaire de neutraliser l'eau avant de pouvoir la rejeter.

L'article 11 du susdit règlement 87 stipule qu' « *il est interdit de rejeter, ou de permettre le rejet, dans un réseau d'égout pluvial ou dans un cours d'eau :... un liquide ou une substance dont la teneur de matières en suspension est supérieure à 30 milligrammes par litre ou qui contient des matières susceptibles d'être retenues par un tamis dont les mailles sont des carrés de six millimètres de côté.* » Puisque la quantité de matières en suspension des eaux de lavage varie de 10 à 100 milligrammes par litre, les usines de béton sont équipées de bassin de décantation.

2.1.2 Recyclage du béton frais

Afin de se conformer aux exigences environnementales, de revaloriser les matières premières et de faire des économies d'argent, les industries européennes et sud-américaines ont développé des équipements afin de recycler tous les matériaux et les résidus associés au lavage des camions, au retour des livraisons de béton non

conforme et le béton non utilisé au chantier. Ces retours de béton représentent environ 5% du béton prêt à l'emploi, livré sur les chantiers [InforBloc, 2005].

Au Québec, les variations climatiques, les bétons spéciaux et les normes concernant la qualité des bétons prêts à l'emploi ajoutent une nouvelle problématique à l'utilisation de l'eau grise. Le terme «eau grise» englobe les eaux de lavage des toupies des camions malaxeurs et les eaux de lavage utilisées dans les stations de recyclage du béton frais. Les termes anglais «*sludge water*» ou «*slurry*» sont parfois utilisés pour désigner les «eaux grises». Ainsi, seules les eaux grises traitées peuvent, à certaines conditions, être utilisées pour le gâchage des bétons. L'eau grise traitée, aussi appelée eau recyclée traitée, doit également respecter certaines exigences normatives portant sur la teneur en chlorures, en sulfates et en matières en suspension.

2.1.3 Les avantages et les inconvénients

Avec l'installation d'un recycleur à béton, il est possible d'éliminer le rejet de l'eau de lavage puisqu'elle est récupérée et réutilisée pour le dosage des nouveaux bétons. De plus, le sable et les granulats sont récupérés et entreposés afin de les réutiliser. À partir d'un système de recycleur de béton frais, il est possible d'exploiter une centrale à béton, sans rejet ni déchet. L'usine de Nanterre, située au milieu de l'agglomération parisienne en Europe, est un bon exemple puisqu'elle ne génère aucun déchet. En plus d'être un système respectueux en tous points de vue au niveau environnemental, il permet de faire des économies considérables sur les matières premières et sur le transport de celles-ci.

Par contre, il y a certains désavantages à l'utilisation d'un système aussi complexe, tout d'abord, au niveau des opérations de production puis au niveau de la qualité du béton. Les différences régionales des matières premières et des températures font varier la qualité des eaux grises. Ainsi, un béton de bonne qualité avec des eaux recyclées demande une période d'essais et erreurs avant de mettre en place la liste des procédures. De plus, au Québec, la température ambiante est très variable comparativement aux sud de États-Unis et dans les pays d'Europe où ce système est

couramment utilisé. Il faut donc avoir un système de refroidissement d'eau en été et un système pour chauffer l'eau en hiver. [Vickers, 2002]

Puisque cette recherche est basée sur la réutilisation de l'eau recyclée dans le béton frais, d'autres avantages et inconvénients au niveau des propriétés physiques du béton seront discutés dans les trois sous-sections suivantes : *Caractéristiques physico-chimiques des bétons contenant des eaux recyclées*, *Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton frais* et la sous-section *Influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton durci*.

2.2 Technologie du recyclage

2.2.1 Les différents appareils

Une usine de recyclage est composée d'une trémie de réception dans laquelle les chauffeurs vidangent le béton frais restant de leur bétonnière au retour du chantier. La trémie est conçue afin de recevoir jusqu'à huit mètres cubes de béton frais, ou tout simplement l'eau de rinçage des bétonnières, et dont la fonction principale est d'éviter une surcharge du baril séparateur ou de la vis sans fin. Une pompe et un système de tuyauterie sont en place afin de diluer les retours de béton dans la trémie de réception avec l'eau grise du bassin ou avec de l'eau potable. L'utilisation de l'eau grise pour diluer le béton permet de minimiser la quantité d'eau potable de la ville. Ensuite, cette trémie de réception dirige le mélange dans un baril séparateur ou une vis sans fin. Les deux appareils sont aptes à faire le même travail qui consiste à diviser le sable et la pierre des eaux grises. Le choix de l'appareil est fait en fonction des différents avantages et inconvénients de chacun. Ceux-ci sont énumérés subséquemment dans ce chapitre.

Le sable et les granulats sont déviés à l'aide d'un convoyeur vers un tamis qui les sépare et les emmagasine dans des entrepôts conçus à cet effet. Les eaux grises sont acheminées dans un bassin d'homogénéisation. À l'intérieur du bassin, il y a des palmes afin de maintenir en agitation l'eau grise. Cette agitation est nécessaire pour maintenir les particules fines en suspension dans l'eau afin d'uniformiser les caractéristiques physico-chimiques de cette eau. L'eau grise est refroidie en été et elle est chauffée en hiver. Ce traitement sert à maximiser l'utilisation de l'eau grise.

Pour ce faire, un système de refroidissement indirect composé d'un serpentin dans lequel de l'eau refroidie circule et fait descendre la température globale de l'eau grise dans le bassin à des températures de 7°C. En hiver, l'eau est chauffée en injectant de la vapeur à l'intérieur du bassin. Cette vapeur permet d'y maintenir la température à environ 50°C. De plus, une conduite apporte l'eau de la ville jusque dans le bassin afin d'ajuster le niveau d'eau et ainsi modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau grise au besoin. Le bassin est équipé d'un densimètre optique et d'un thermomètre. La lecture est faite de façon instantanée et est acheminée en continu à l'ordinateur. Une pompe achemine l'eau grise à l'usine de béton pour alimenter les nouveaux mélanges. Cette eau est aussi utilisée pour le rinçage des bétonnières et le rinçage de la trémie de réception. Finalement, un panneau de contrôle coordonne les opérations via le système informatique du doseur.

L'usine de recyclage peut fonctionner avec deux types de séparateurs différents. Le premier système est composé d'une vis sans fin et le second est muni d'un baril séparateur. Le système est illustré à la figure 2.1.

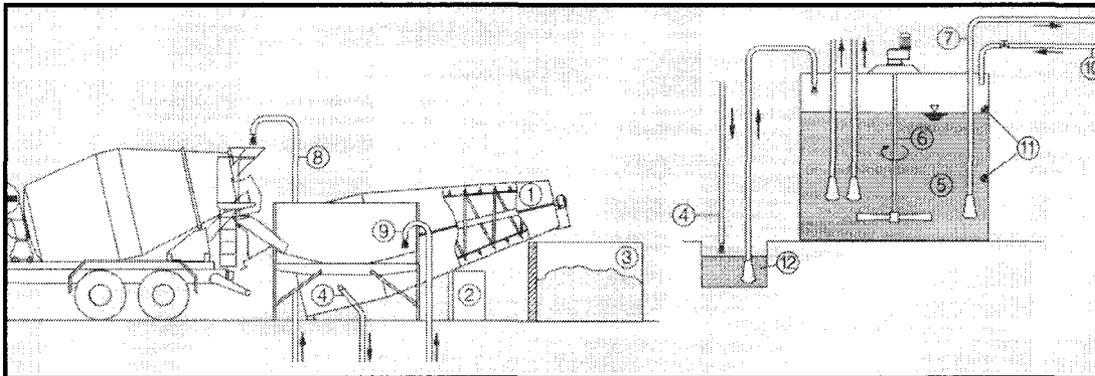


Figure 2.1 – Système de recyclage avec baril séparateur

① Wash-out device	⑤ Residual water vat /container	⑨ Flushing line to feed hopper
② Stored program control	⑥ Stirrer	⑩ Fresh water supply
③ Mixed gravel box	⑦ Batching line to water weigher	⑪ Level switch for fresh water s
④ Overflow for fines/water mixture	⑧ Flushing line to washing mast	⑫ Pump sump

Figure 2.2 – Nomenclature

Le principal avantage d'une vis sans fin est qu'elle nécessite moins d'espace que le baril séparateur. De plus, le système de vis sans fin est plus résistant lors des

températures avoisinant le point de congélation [BIBKO system, 2003]. Ces systèmes ne sont donc pas adaptés pour des températures d'hiver comme au Québec. Il faut donc prévoir les installer dans un bâtiment chauffé.

Le baril séparateur a l'avantage d'être plus facile à ouvrir lors de l'entretien. De plus, il est conçu pour recevoir un plus grand volume par heure soit environ 3 m³/h de plus que la vis sans fin. Finalement, puisque le baril séparateur est plus long, le matériel est plus sec et il est plus propre à la sortie comparativement aux résultats obtenus à partir de la vis sans fin [BIBKO system, 2003].

Le matériel utilisé pour cette recherche a été prélevé dans une usine dotée d'un baril séparateur et d'un bassin d'homogénéisation ayant une capacité de 100 000 litres. Afin de protéger les installations, un bâtiment fonctionnel a été aménagé spécialement pour le recyclage du béton frais.

2.2.2 Production contenant de l'eau recyclée

Le dosage de l'eau recyclée de cette usine prend en compte la concentration des solides dans l'eau recyclée et la température des différentes eaux. Grâce au densimètre optique et au thermomètre, la lecture est instantanée et prise en continu à l'intérieur du bassin. Après avoir calculé la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée, l'ordinateur a le choix de trois eaux. La priorité est l'utilisation de l'eau recyclée, ensuite l'ordinateur prendra l'eau tempérée et finalement l'eau de l'aqueduc. L'eau tempérée est l'appellation utilisée pour l'eau qui provient de la bouilloire en hiver ou de la glace en été. L'ordinateur indique donc les quantités de chacune des trois eaux nécessaires pour la fabrication du mélange. Le premier critère est la concentration en solides (ppm) à respecter dans le mélange. L'ordinateur choisira la quantité maximum d'eau recyclée afin de ne pas dépasser la limite maximale de 50 000 ppm. Ensuite, il prendra en considération la température de l'eau recyclée, puis celle de l'eau tempérée et de l'eau d'aqueduc afin d'obtenir un mélange d'eau à la température désirée. Le doseur doit approuver les différents choix offerts par l'ordinateur avant la mise en œuvre du béton.

2.2.3 Composition de l'eau recyclée

L'eau à l'intérieur du bassin d'homogénéisation contient des substances en solution (ions, adjuvants) et des matières en suspension (particules minérales fines et hydrates du ciment) [Su et coll., 2002, Chatveera et coll., 2005, Vickers, 2002]. La composition chimique (nature et concentration des substances en solution et en suspension) de l'eau recyclée 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 (taux de dilution) et en fonction des caractéristiques des bétons récupérés (teneur en adjuvants, type des matières cimentaires et nature des granulats). Les teneurs en matières en suspension sont très variables et elles sont généralement comprises entre 10 000 et plus de 50 000 ppm. En pratique, les producteurs de béton ajustent la teneur en matières en suspension en ajoutant de l'eau fraîche dans les bassins de stockage de l'eau recyclée [Vickers 2003].

2.3 Les normes

Au Québec, trois normes régissent l'utilisation de l'eau recyclée dans l'eau de gâchage; l'Association canadienne de normalisation (CSA), l'American Society for Testing and Materials Standards (ASTM) et le Bureau de normalisation du Québec (NQ). L'Association canadienne de normalisation (CSA) exige que l'eau entrant dans la confection de béton à base de ciment Portland et l'eau utilisée pour la cure doivent être claires et exemptes de quantités nuisibles d'huiles, d'acides, d'alcalis, de chlorures solubles, de matières organiques, de sédiments ou de toutes autres matières dommageables. Il est également interdit d'utiliser une eau de lavage non traitée dans les mélanges de béton. L'eau de lavage traitée doit être conforme aux exigences énumérées précédemment. De plus, le béton produit avec une eau de qualité douteuse doit produire des résistances à 28 jours égaux à au moins 90% des résistances, obtenues à l'aide de mortier préparé avec une eau jugée acceptable selon la méthode d'essai CSA A23.2-8A.

De façon plus précise, les normes ASTM C94 et CSA A23.1 limitent la teneur maximale en solides dans l'eau de gâchage à 50 000 ppm et les concentrations en chlorure et en sulfate doivent être inférieures à 500 mg/l et 3000 mg/l respectivement.

La norme NQ 2621-900 exige, elle aussi, que la teneur maximale en solides soit inférieure à 50 000 ppm dans l'eau de gâchage.

2.4 Caractéristiques physico-chimiques des bétons contenant des eaux recyclées

Sandrolini et Franzoni 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%) [Sandolini et Franzoni, 2001], de particules de C-S-H et d'ettringite [Chatveera et coll., 2005]. De plus, les matières en suspension ont un très faible potentiel de réactivité chimique [Vickers, 2003].

Le tableau 2.1 indique les valeurs obtenues, lors de l'analyse, des matières (séchées) en suspension dans les eaux recyclées et ainsi montre que les teneurs des principaux oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3) sont très voisines de celles d'un ciment Portland [Chatveera et coll. 2005].

Tableau 2.1 – Composition chimique du ciment Portland GU et des matières en suspension séchées

Matériaux	Composition chimique (%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Free CaO
Ciment Portland normal	20,8	5,2	3,2	66,3	1,2	0,2	0,1	2,4	0,99
Matières en suspension séchées	26,9	6,9	3,2	3,2	1,5	1,0	0,2	4,0	0,62

Les eaux recyclées ont habituellement un pH compris entre 12,0 et 12,7. Ce pH élevé est principalement dû à la présence d'alcalis en solution. Les ions de calcium (Ca^{2+}) et les ions d'hydroxyde (OH^-) proviennent de la décomposition de la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Celle-ci étant un produit de la réaction d'hydratation du ciment Portland.

Selon les matériaux entrant dans la fabrication des bétons recyclés et selon la composition chimique des eaux de lavage, les eaux recyclées peuvent aussi contenir des chlorures et des sulfates en solution. L'utilisation d'eau recyclée peut donc

modifier la cinétique des réactions d'hydratation du ciment Portland [Sandrolini et Franzoni, 2000]. La nature et la sévérité des effets sur l'hydratation est en fonction de la concentration des alcalis et des sulfates en solution dans l'eau recyclée. En pratique, ces concentrations peuvent être très variables en fonction du taux de dilution utilisé par les installations de traitement et de recyclage. On peut calculer approximativement l'apport en alcalis découlant de l'utilisation d'une eau de gâchage constituée d'eau recyclée ayant une teneur en matières solides très élevée de 100 000 ppm (en supposant que toutes ces matières solides soient apportées par le ciment). Pour un béton typique ($E/C=0,5$) contenant 350 kg/m^3 de ciment (0,80 % Na_2O eq.) et 175 kg/m^3 d'eau recyclée, on peut démontrer que l'utilisation d'eau recyclée contribue à augmenter d'environ 5% le contenu en alcalis du béton (la teneur en alcalis du ciment passe à 0,84% Na_2O eq.). L'apport d'alcalis par l'eau recyclée est donc relativement faible.

Les effets 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. Les alcalis (Na_2SO_4 , K_2SO_4) 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 (1 – 10 h) et par une diminution du temps de prise [Odler et Wonnemann, 1983]. Le K_2SO_4 accélère davantage la prise que le Na_2SO_4 [Odler et Wonnemann, 1983]. Certains auteurs indiquent que les alcalis accélèrent l'hydratation du C_3S et du C_2S [Jawed et Skalny, 1978] alors que d'autres chercheurs n'ont pas trouvé d'effet significatif [Odler et Wonnemann, 1983]. L'accélération de l'hydratation est plus importante durant les 7 premiers jours et devient négligeable après 28 jours [Jawed et Skalny, 1978]. Smaoui et coll. [2005] ont démontré que les pâtes de ciment contenant des dosages plus élevés en alcalis (1,25% Na_2O eq.) ont une microstructure plus poreuse et plus réticulaire que celle des pâtes ayant une plus faible teneur en alcalis (0,6% Na_2O eq.).

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

2.5.1 Température

La température du mélange final est un paramètre de contrôle en chantier puisqu'elle influence les propriétés du béton frais et durci. Le contrôle de la température de l'eau s'avère le moyen le plus efficace de contrôler la température du mélange. L'équation suivante permet de calculer la température finale du mélange en incluant tous les constituants du béton.

$$T^{\circ} = \frac{0.22(T_g M_g + T_c M_c) + T_h M_h + T_e M_e}{0.22(M_g + M_c) + M_h + M_e} \quad (1.1)$$

M_g = Masse des granulats (Kg)

T_g = Température des granulats (°C)

M_h = Masse d'humidité contenue
dans les granulats (Kg)

T_h = Température de l'humidité
contenue dans les granulats (°C)

M_c = Masse de ciment (Kg)

T_c = Température du ciment (°C)

M_e = Masse d'eau (Kg)

T_e = Température de l'eau (°C)

Par contre, la température de l'eau recyclée a le même effet qu'une eau potable de même température. Puisque la température du mélange final est un paramètre important et qu'il varie beaucoup en fonction de la température des matériaux, il est primordial de contrôler la température de l'eau recyclée dans le bassin. C'est pour cette raison que le bassin doit être composé d'un système de refroidissement et/ou d'un système de réchauffement de l'eau recyclée. De plus, la température finale du mélange joue un rôle significatif sur certaines propriétés du béton frais telles que l'affaissement, la maniabilité et le temps de prise.

2.5.2 Affaissement et mise en place

L'utilisation de l'eau recyclée engendre une réduction de l'affaissement et ainsi réduit la maniabilité du béton [Sandrolini et Franzoni, 2000]. Cette perte d'affaissement est en fonction de la quantité de matières solides en suspension dans l'eau de gâchage. Des chercheurs de l'Université de Thaïlande sont aussi arrivés à cette conclusion après avoir fait des essais avec une eau contenant jusqu'à 63 400 mg/l de matières en suspension dans l'eau de gâchage. Cette perte d'affaissement est due aux particules fines entraînées par l'eau recyclée qui augmentent la demande en eau du béton et en réduisent également la maniabilité [Chatveera et coll., 2005].

2.5.3 Temps de prise

L'ajout d'eau recyclée dans l'eau de gâchage a un effet sur le temps de prise des bétons. Par contre, cette caractéristique s'avère un aspect contredit dans la littérature. Selon Vickers [2002] ainsi que Su et coll. [2002], le temps de prise est accéléré lors de l'utilisation de l'eau recyclée. Plus la proportion d'eau recyclée augmente, plus ses effets sont importants. Le temps de prise plus court découlerait essentiellement de l'accélération de l'hydratation engendrée par la présence des alcalis en solution dans l'eau recyclée.

Par contre, selon Borger et coll. [1994], le temps de prise varie (accélère ou retarde) de 25% lors de l'utilisation de l'eau grise dans des mortiers. L'eau recyclée utilisée lors de ces essais a été fabriquée précisément pour l'expérimentation. C'est-à-dire qu'elle était composée de différents types de ciment et d'eau seulement. Les nouveaux mortiers avaient été fabriqués avec une eau qui a été mélangée durant 15 minutes et une autre durant 24 heures. L'eau recyclée utilisée pour la recherche de Borger et coll. est donc moins représentative de l'eau utilisée dans notre recherche car l'eau recyclée de cette recherche contient de l'eau, des particules de ciment, des particules fines de sable et des adjuvants, contrairement à l'eau utilisée lors de la recherche de Borger et coll. qui contient seulement de l'eau et du ciment.

Puisque que l'eau recyclée utilisé lors des recherches de Vickers [2002] ainsi que de Su et coll. [2002] est plus représentative de l'eau recyclée utilisée lors de cette

recherche, le temps de prise, lors des essais de cette recherche, devrait être accéléré.

2.5.4 Caractéristiques du réseau de bulles d'air

Relativement peu de données sont disponibles sur l'influence de l'eau recyclée sur le réseau de bulles d'air. Par contre, la littérature indique que les effets semblent provenir de deux sources différentes, d'une part des particules fines, et d'autre part des alcalis.

2.5.4.1 L'effet des particules fines sur la porosité

Une étude menée par Sandrolini et Franzoni [2000] a démontré que les échantillons avec eau recyclée génèrent une moins grande porosité que les échantillons de référence. L'étude réalisée sur la microporosité des mortiers a été faite sur les pores ayant un diamètre inférieur à 0,05 μm . Les résultats montrent que ce sont les particules fines apportées par l'eau recyclée qui engendrent cette diminution de porosité. Plus les particules apportées dans l'eau recyclée sont nombreuses, plus la porosité diminue [Sandrolini et Franzoni, 2000]. Malheureusement, l'article n'indique pas les quantités de solides dans l'eau de gâchage des mélanges.

En contrepartie, des chercheurs de l'Université des sciences et technologies de Taïwan et de l'Université de Moncton indiquent que la quantité d'air n'est pas affectée par l'utilisation de l'eau recyclée dans les mélanges. Leurs études ont porté sur l'utilisation de l'eau potable, l'eau décantée et l'eau recyclée dans les bétons. Les teneurs en solide dans l'eau de gâchage de l'étude cité ci-haut varient de 133 à 5777 parties par million.

2.5.4.2 L'effet des alcalis sur le réseau de bulles d'air

Une étude menée par Pigeon et coll. sur l'influence des alcalis solubles sur l'air entraîné des mélanges de bétons avec et sans superplastifiant a démontrée que les alcalis solubles n'ont pas une influence notable sur le facteur d'espacement. Par contre, celle-ci a permis de découvrir que la stabilité du réseau de bulles d'air augmente de façon significative dans le temps, plus particulièrement dans les mélanges avec superplastifiant. Les auteurs de la recherche expliquent les résultats de leur recherche par la formation d'un film insoluble autour des vides d'air. Des

groupements hydrophiles et hydrophobes se forment au périmètre des bulles d'air pour stabiliser le réseau de bulle d'air.

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

2.6.1 Résistance à la compression

Certaines propriétés du béton durci (résistance à la compression et à la flexion, retrait) peuvent être influencées par l'utilisation d'eau recyclée utilisée comme eau de gâchage du béton. Les données de la documentation technique démontrent que l'eau recyclée a relativement peu d'effet sur les propriétés mécaniques lorsque la concentration des matières en suspension est inférieure à 50 000 ppm [Vickers, 2003]. Pour ces faibles concentrations, la résistance à la compression à 7 jours est en général similaire ou légèrement supérieure (1 à 15%) à la résistance des bétons témoins fabriqués sans eau recyclée [Su et coll., 2002]. La résistance à la compression à 28 jours est équivalente ou légèrement plus faible que celle des bétons témoins [Su et coll., 2002, Chatveera, 2005]. Les résistances à 28 jours sont généralement comprises entre 90% et 95% de la résistance à la compression du béton témoin, fabriqué sans eau recyclée [Su et coll., 2002, Chatveera, 2005].

Il semble n'exister qu'une seule étude sur la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des eaux recyclées ayant une teneur en matières en suspension supérieure à la limite de 50 000 ppm de la norme ASTM C94. Les travaux de Chatveera et coll. [2005], réalisés avec des bétons ayant des rapports E/C de 0,5, 0,6 et 0,7, ont démontré qu'une teneur en matières solides en suspension de 64 000 ppm n'a engendré qu'une chute maximale de 12% de la résistance à la compression à 28 jours. Cette diminution serait due au processus d'hydratation. L'ettringite se transforme en monosulfate d'aluminium pour ensuite se dissoudre. La dissolution des monosulfates d'aluminium engendre des pores additionnels qui font diminuer la résistance à la compression. Par contre, l'alcalinité de l'eau recyclée fait diminuer la zone de transition qui se situe entre la pâte et les granulats, ce qui contribue à augmenter légèrement la résistance à la compression.

2.6.2 Retrait de séchage

L'utilisation d'eau recyclée pour le gâchage des bétons peut produire une forte augmentation du retrait de séchage. Les travaux de Chatveera et coll. [2005] ont démontré que le retrait de séchage des bétons ayant des rapports E/C de 0,5, 0,6 et 0,7 augmentait proportionnellement avec la teneur en matières en suspension dans l'eau recyclée. Le retrait de séchage des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée contenant 64 000 ppm de matières en suspension 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 de cette augmentation.

2.6.3 Durabilité

Il existe très peu de données sur la durabilité des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée. Les travaux de Chatveera et coll. [2005] ont comporté des mesures de résistance à l'attaque par les acides sulfuriques et chlorhydriques. Les résultats indiquent que l'eau recyclée augmente la perte de masse (dégradation de la surface) due à l'attaque acide. L'influence de l'eau recyclée sur la durabilité au gel n'a jamais directement été étudiée. Seules quelques données sont disponibles sur l'influence de l'eau recyclée sur la teneur en air des bétons sans air entraîné [Su et coll., 2002] et sur l'influence des alcalis du ciment sur l'entraînement d'air [Smaoui et coll., 2005, Pigeon et coll., 1992]. Les résultats de ces études démontrent que l'air occlus n'est pas affecté de façon appréciable par l'utilisation de l'eau recyclée et que l'eau recyclée permet de stabiliser le réseau de bulle d'air d'un mélange avec air entraîné mais n'affecte pas le facteur d'espacement de celui-ci. Par conséquent, l'utilisation de l'eau recyclée n'affecterait pas la durabilité des bétons.

3 BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS

3.1 Exposé de la problématique

L'utilisation d'eau recyclée est de plus en plus fréquente pour la fabrication des nouveaux bétons, pour des raisons environnementales et pour minimiser les coûts reliés à l'élimination de ce déchet. Présentement, certains fabricants de béton utilisent cette eau en petite quantité (moins de 50 000 ppm) ce qui permet d'éviter les effets engendrés par l'emploi de cette eau.

Le but de cette recherche est de comprendre les effets engendrés par l'utilisation de l'eau recyclée. Des études ont déjà permis de comprendre certaines conséquences de son utilisation sur le béton frais et durci. Par contre, il faut valider les résultats obtenus lors des recherches antérieures et déterminer les effets sur la durabilité puisque cet aspect ne semble pas avoir fait l'objet de recherche. De plus, cette recherche tente de pousser un peu plus loin les données connues jusqu'à présent. La littérature mentionne des résultats obtenus avec des concentrations qui varient de 0 à 63 000 ppm. Cette étude sera faite méthodiquement avec des concentrations précises variant de 0 à 100 000 ppm dans l'eau de gâchage et ce, pour quatre types de bétons. L'eau recyclée utilisée pour cette étude à une concentration de 110 000 ppm. Par contre, celle-ci est mélangée avec de l'eau de l'aqueduc (0 ppm) afin de faire varier la concentration des solides dans l'eau de gâchage.

Les teneurs en solides en suspension dans l'eau de gâchage supérieures à 50 000 ppm sont étudiées, d'une part pour maximiser les effets potentiels sur les propriétés des bétons et d'autre part, pour déterminer comment compenser certains effets occasionnés par l'eau recyclée (perte de résistance, perte d'affaissement, diminution du temps de prise et du ressuage, perte de durabilité, etc.) en modifiant l'adjuvantation des bétons (réducteur d'eau, superplastifiant, retardateur de prise). Cependant, la partie adjuvantation ne sera pas exécutée dans le cadre de ce projet. Elle fera partie d'un projet consécutif à cette étude.

Les résultats qui seront obtenus de l'étude en laboratoire seront validés en usine afin de faire le parallèle avec la réalité industrielle.

3.2 Objectifs spécifiques

Pour pouvoir répondre à l'objectif de départ, des objectifs spécifiques ont été élaborés : une première partie de type fondamental, suivie d'une partie de type appliqué. Le volet fondamental vise globalement à mieux comprendre les mécanismes d'interaction physico-chimiques entre l'eau recyclée et la cinétique d'hydratation des matériaux cimentaires. Le volet appliqué cherche à exploiter ces nouvelles connaissances fondamentales afin d'optimiser la production industrielle des bétons de ciment fabriqués avec de l'eau recyclée. Globalement, cette recherche permettra aussi d'optimiser la performance environnementale de l'industrie du béton.

Au niveau fondamental, le projet de recherche vise à atteindre les principaux objectifs spécifiques suivants :

- Dégager les principaux mécanismes d'interactions physico-chimiques entre l'eau recyclée et la cinétique d'hydratation des matériaux cimentaires.
- Identifier et comprendre l'influence des principaux paramètres de composition de l'eau recyclée (teneurs en chlorures, en sulfates, alcalinité, pH, teneur en solides, etc.) sur les propriétés des bétons frais (affaissement, temps de prise et ressuage) et durcis.
- Identifier les principaux paramètres de composition de l'eau recyclée pouvant influencer la durabilité au gel des bétons avec eau recyclée (fissuration interne et écaillage).
- Comprendre l'influence de l'eau recyclée sur la production et la stabilité du réseau de bulles d'air entraîné.
- Caractériser, en laboratoire et en chantier, la durabilité au gel (fissuration interne et écaillage) des bétons contenant des proportions variables d'eau recyclée.

Du point de vue industriel, le projet de recherche vise les principaux objectifs spécifiques suivants :

- Comprendre les limites d'utilisation des stations de recyclage pour pouvoir maximiser le recyclage sans affecter la qualité des bétons fabriqués avec les matériaux recyclés.
- Dégager des recommandations pratiques concernant la formulation des bétons produits à partir de matériaux récupérés à l'aide du recycleur.

Afin de faciliter l'identification des différents mélanges fabriqués lors de cette recherche, une dénomination spécifique au travail a été utilisée. La première lettre représente le lieu de fabrication du mélange soit en usine ou en laboratoire. Les deux chiffres suivants indiquent la classe de résistance, suivis de deux lettres indiquant la présence ou l'absence d'air entraîné. Les derniers chiffres indiquent la teneur en solides présents dans l'eau de gâchage, exprimée en milliers de ppm. Finalement, pour certains bétons, une lettre s'ajoute en indice afin d'indiquer si la partie solide ou liquide de l'eau recyclée a été utilisée. Lorsque cette précision n'apparaît pas, ce sont les parties liquides et solides de l'eau recyclée qui sont utilisées.

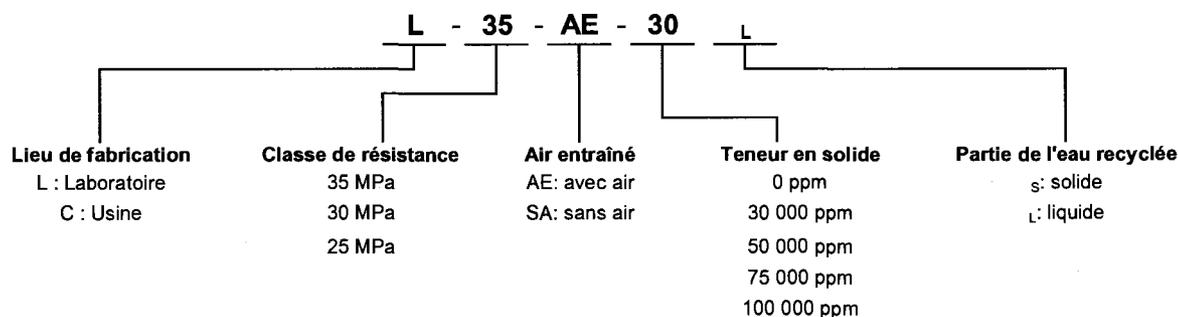


Figure 3.1 – Appellation spécifique des mélanges

3.3 Méthodologie

Les principaux objectifs de recherche pourront être atteints à l'aide d'une méthodologie de recherche comportant trois principaux volets expérimentaux. Chacun des trois volets permettra de répondre à certains objectifs spécifiques présentés à la section précédente.

3.3.1 Phase 1 – Caractérisation physico-chimique des eaux recyclées

Cette phase de la recherche vise à obtenir une caractérisation physico-chimique détaillée des eaux récupérées suite au recyclage du béton frais dans l'usine de la Compagnie *Demix Béton* sur une période de 12 mois. La figure 3.2 présente le travail effectué dans le cadre de cette première phase.

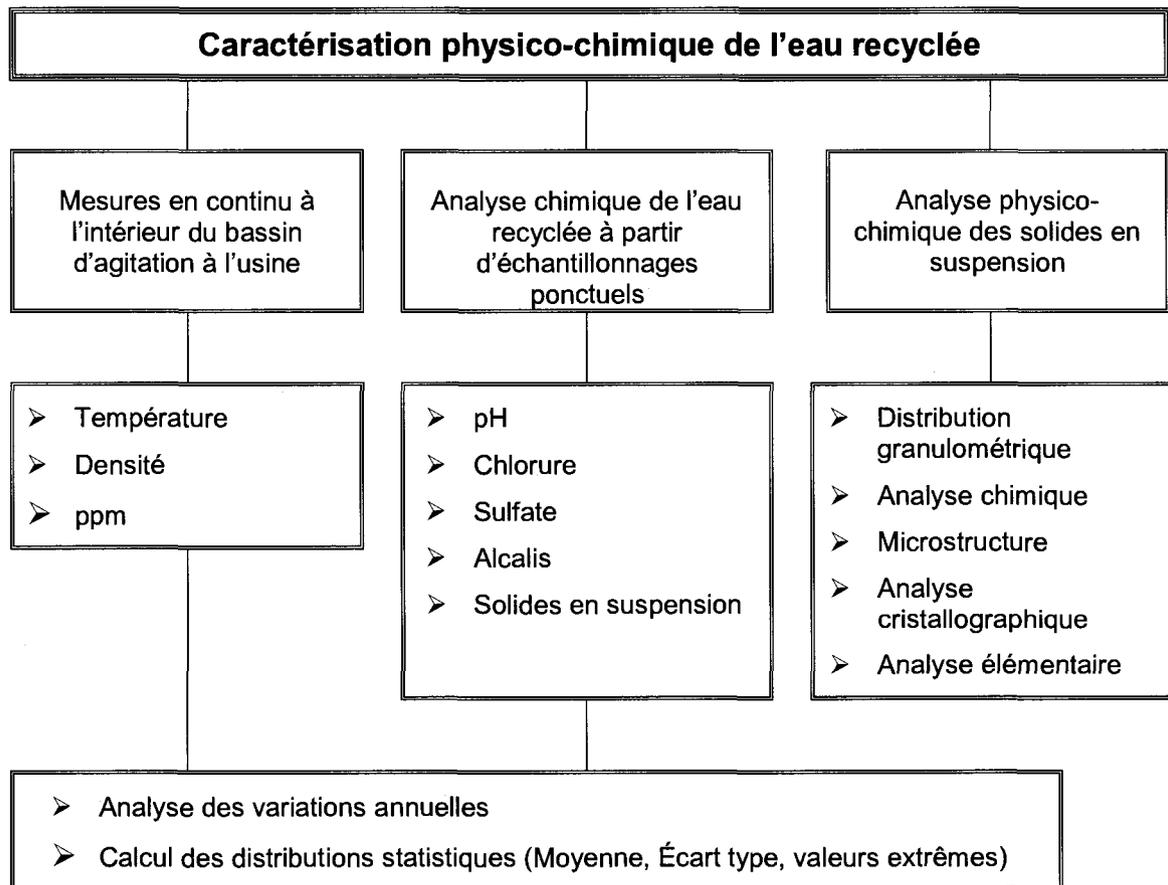


Figure 3.2 – Caractérisation physico-chimique de l'eau recyclée

Les différentes concentrations exprimées en ppm dans cette phase du projet représentent la concentration de l'eau recyclée dans le bassin de l'usine.

Un système automatique de mesure de la température et de la densité permet de suivre l'évolution de ces deux paramètres sur une période de 12 mois. Les données recueillies permettent de vérifier s'il est possible d'établir des corrélations entre la densité et les teneurs en chlorures, en sulfates et en alcalis. Cette approche offre

aussi la possibilité d'évaluer les variations saisonnières des caractéristiques physico-chimiques de l'eau recyclée. Finalement, les particularités de la composition chimique pourront être identifiées par une analyse physico-chimique détaillée, réalisée sur quelques échantillons jugés représentatifs.

3.3.2 Phase 2 – Influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons fabriqués en laboratoire

Cette phase de la recherche est subdivisée en deux parties. Dans un premier temps, les mélanges ont été fabriqués avec les composantes solides en suspension et les ions en solution dans l'eau recyclée. Cette partie permet de comprendre l'effet combiné des solides et des ions sur les propriétés des bétons pour ainsi comprendre et quantifier l'influence de la teneur en eau recyclée (effet combiné) sur les propriétés des bétons frais et durcis. Les résultats permettront notamment de déterminer quelles sont les propriétés les plus sensibles à l'utilisation de l'eau recyclée et quelles sont les limites pratiques d'utilisation de l'eau recyclée dans quatre types de béton d'usage courant : 1) Béton avec air entraîné de 35 MPa ; 2) Béton sans air entraîné de 30 MPa ; 3) Béton avec air entraîné de 25 MPa ; 4) Béton sans air entraîné de 25 MPa.

Ensuite, la partie liquide de l'eau recyclée est séparée de la partie solide (effet séparé) pour ainsi déterminer les effets spécifiques de chacune des deux composantes sur les propriétés des bétons frais et durcis. Deux types de béton ont été fabriqués en laboratoire : 1) Béton sans air entraîné de 30 MPa [phase liquide de l'eau recyclée]; 2) Béton avec air entraîné de 25 MPa [phase solide de l'eau recyclée].

La phase liquide de l'eau recyclée est composée d'eau et d'ions en solution. La phase solide est composée de l'eau sans les ions en solution ainsi que des solides en suspension dans l'eau recyclée. Le but de l'industrie étant d'augmenter l'utilisation de l'eau recyclée dans l'eau de gâchage, cette partie de l'étude devrait permettre de vérifier lequel des deux paramètres, soit les solides en suspension ou les ions en solution, est le plus critique lors de l'augmentation de la concentration de l'eau recyclée dans l'eau de gâchage.

Les concentrations de solides en suspension dans l'eau de gâchage ont été obtenues en utilisant l'eau recyclée prélevée dans le bassin de l'usine au début de l'expérimentation. La concentration de cette eau recyclée était à 110 000 ppm. Celle-ci a été diluée avec de l'eau potable (0 ppm) afin d'obtenir les concentrations visées.

La figure 3.3 synthétise la phase II du projet. Les concentrations exprimées dans le tableau sont des teneurs en solide dans l'eau de gâchage (eau recyclée + eau potable).

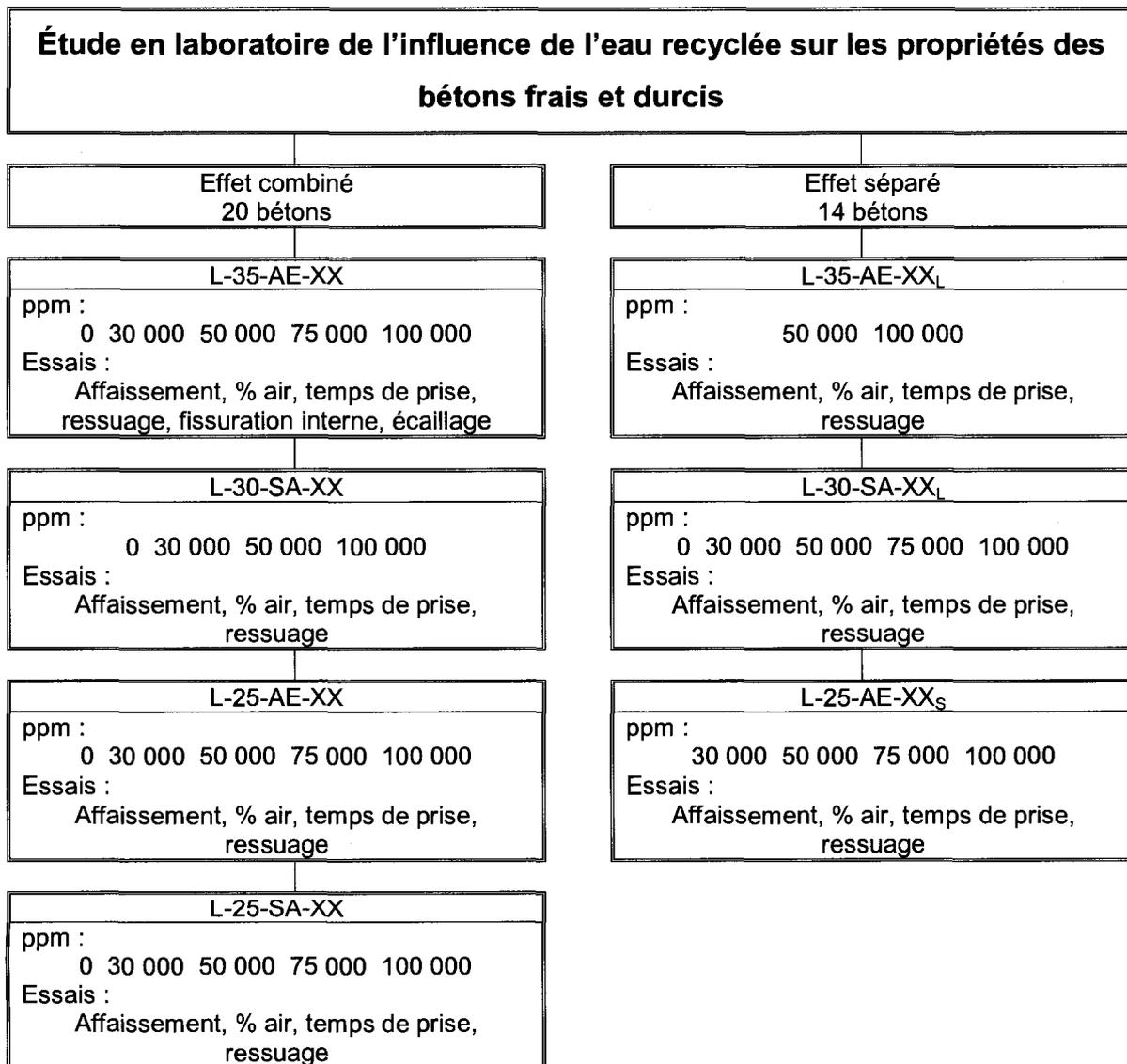


Figure 3.3 – Étude en laboratoire de l'influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons

3.3.3 Phase 3 – Influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons fabriqués en usine

Les essais en usine visent à évaluer la validité des conclusions dégagées de l'étude en laboratoire à partir de quatre types de béton produits commercialement. Comme dans le cas de l'étude en laboratoire, les dosages en eau recyclée ont été variés pour produire des eaux de gâchage ayant des teneurs en solides en suspensions comprises entre 21 000 et 67 000 ppm dans l'eau de gâchage. Quatre types de béton ont été fabriqués en usine : 1) Béton avec air de 35 MPa; 2) Béton sans air entraîné de 30 MPa; 3) Béton avec air entraîné de 25 MPa; 4) Béton sans air entraîné de 25 MPa. La figure 3.4 résume ce qui a été fait dans cette phase de la recherche.

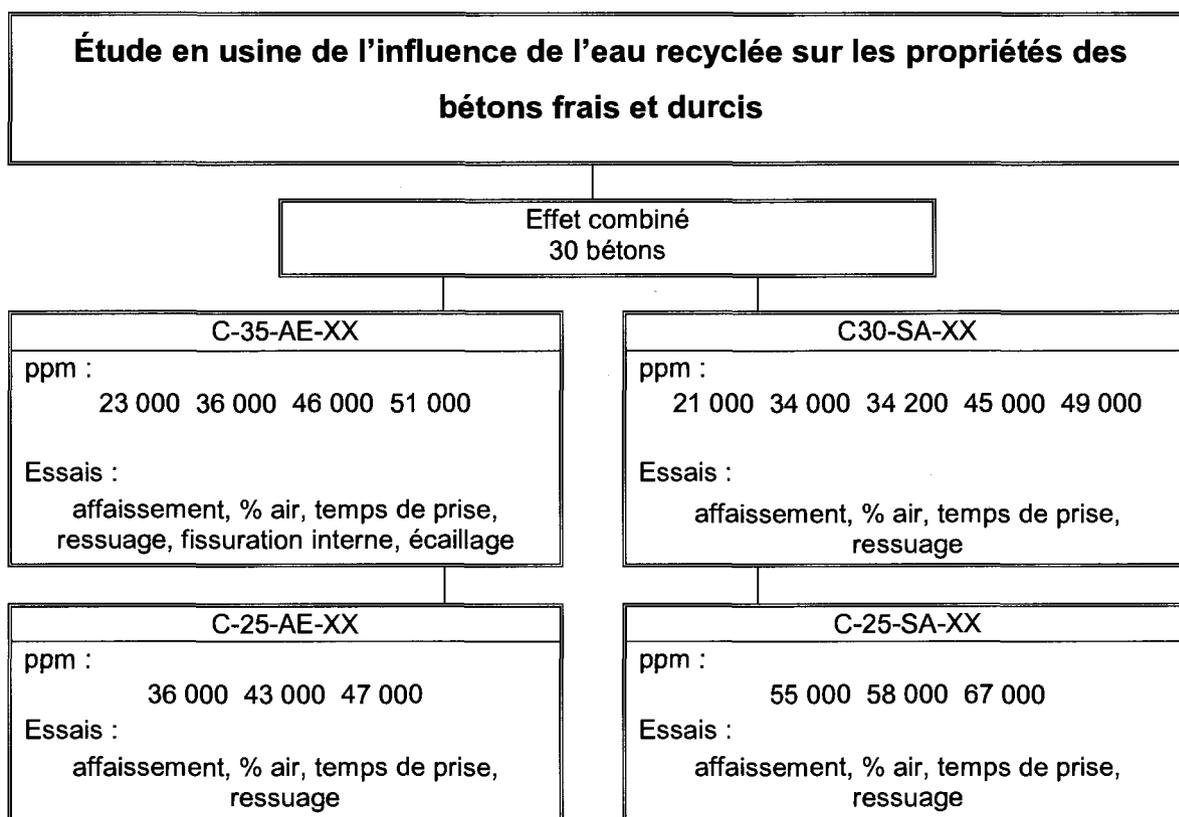


Figure 3.4 – Étude en usine de l'influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons

4 MATÉRIAUX, MÉLANGES ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

4.1 Matériaux

4.1.1 Eau

Les bétons fabriqués en laboratoire et en usine ont été fabriqués avec des quantités variables d'eau recyclée et d'eau potable. Dans les formulations de béton de ce programme de recherche, la proportion d'eau recyclée est indirectement exprimée par la teneur en solides totaux dans l'eau de gâchage.

Les bétons produits en laboratoire ont été gâchés avec une eau recyclée, prélevée dans le bassin d'homogénéisation et de stockage d'une usine de béton. Environ 400 litres d'eau recyclée, ayant une teneur en solides de 110 000 ppm, ont été stockés au laboratoire dans des contenants de 200 litres, munis d'agitateurs à hélice. Le pH de l'eau recyclée est de 12,7 et les teneurs en chlorures et en sulfates sont de 700 mg/L (0,658 x potassium + sodium) et 8,1 mg/L. Lors de la fabrication des bétons en laboratoire, la quantité d'eau recyclée a été ajustée de manière à produire des teneurs en solides en suspension de 30 000, 50 000, 75 000 et 100 000 ppm dans l'eau de gâchage (mélange eau recyclée + eau potable).

Par la phase *effets séparés*, des bétons ont été fabriqués avec la composante liquide ou la composante solide seulement de l'eau recyclée. Pour fabriquer des bétons avec la composante solide seulement, la quantité d'eau recyclée nécessaire a été prélevée du baril. Après une décantation d'environ 25 heures, le surnageant a été extrait et de l'eau potable a été ajouté afin de retrouver le même volume initial. Ce processus a été répété 5 à 6 fois pour éliminer un maximum d'ions en solution.

Pour fabriquer les bétons avec la partie liquide seulement de l'eau recyclée, il suffit de faire décanter les solides d'un certain volume d'eau recyclée et prélever la quantité désirée d'eau recyclée (ions en solution seulement).

Les bétons produits en usine ont été gâchés avec de l'eau recyclée provenant du bassin de stockage et d'homogénéisation de l'usine. Un système de mesure en

continu permet d'estimer la teneur en solides totaux de l'eau recyclée. Les bétons d'usine ont été fabriqués avec des eaux recyclées ayant des teneurs en solides comprises entre 60 000 et 150 000 ppm à l'intérieur du bassin. Lors de la production du béton, le système de dosage automatisé peut calculer les proportions d'eau potable et d'eau recyclée requises pour obtenir la teneur en solides souhaitée dans l'eau de gâchage (eau recyclée + eau potable). Les deux derniers chiffres apparaissant dans les noms de tous les bétons indiquent la teneur en solides ($\times 1000$ ppm) dans l'eau de gâchage.

L'eau de gâchage des bétons de cette étude est la somme des masses d'eau potable et d'eau recyclée. La masse d'eau recyclée inclut la masse de la phase liquide et la masse des solides en suspension dans celle-ci. Pour faciliter l'analyse des résultats, les dosages en eau (kg/m^3) des formulations de béton ont été fractionnés en trois composantes. Pour chaque béton, les tableaux 4.7 à 4.12 indiquent le dosage en eau potable (Eau Pot.), le dosage de la phase liquide de l'eau recyclée (Eau Rliq.) et le dosage des solides en suspension dans la phase liquide de l'eau recyclée (Solides). Cette approche permet de définir le rapport eau/liant apparent (E/L_{app}) qui correspond à la somme des masses d'eau potable, de la phase liquide de l'eau recyclée et des solides en suspension, divisée par la masse du liant. On peut aussi calculer un rapport eau/liant réel (E/L_{Reel}) qui correspond à la somme des masses d'eau potable et de la phase liquide de l'eau recyclée, divisée par la masse du liant.

4.1.2 Ciments

Tous les bétons en laboratoire ont été fabriqués avec deux types de ciment provenant de la même usine. Ces deux types de ciment sont un ciment Portland normal (type GU) et un ciment Portland contenant 8 % de fumée de silice (type GUb-SF). Les composantes chimiques et minéralogiques de ces ciments sont présentées aux tableaux 4.1 et 4.2. La finesse Blaine est de $382 \text{ m}^2/\text{kg}$ pour le ciment de type GU et de $523 \text{ m}^2/\text{kg}$ pour le ciment de type GUb-SF.

Tableau 4.1 – Composition chimique des ciments

Composition chimique (%)	Ciment type GU	Ciment type GUb-SF
SiO ₂	20,2	26,4
Al ₂ O ₃	4,7	4,5
Fe ₂ O ₃	2,1	2,0
CaO	63,2	57,6
MgO	2,0	1,8
SO ₃	3,5	3,3
Na ₂ O équi.	0,83	0,82
Perte au feu	2,8	2,9
Insolubles	0,30	-
Chaux libre	0,9	-

Tableau 4.2 – Composition minéralogique des ciments (composition de Bogue)

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

*Les certificats de ciment sont en annexe

Le ciment utilisé en usine provenait des silos à ciment de l'usine de Ville LaSalle. Les compositions chimique et minéralogique sont donc très variables puisque l'usine s'approvisionne à la cimenterie de Joliette et, à l'occasion, à la cimenterie de Mississauga. Il est donc impossible d'avoir l'information précise des ciments pour la partie des bétons fabriqués en usine.

4.1.3 Granulats

4.1.3.1 Granulat fin

Le granulat fin utilisé lors de la fabrication des bétons en laboratoire est un sable siliceux naturel de la région de Sherbrooke. Une première série de béton (L-35-AE-XX et L-30-SA-XX) a été faite à l'été 2005, suivie, à l'automne 2006, d'une deuxième série (L-25-AE-XX, L-25-SA-XX, L-25-AE-XX_S et L-30-SA-XX_L).

La densité à l'état saturé superficiellement sec est de 2,65 à l'été 2005 et de 2,64 à l'automne 2006. Le module de finesse est de 2,59 à l'été 2005 et de 2,49 à l'automne 2006. Le coefficient d'absorptivité est de 1,38% à l'été 2005 et de 1,43% à l'automne 2006. La granulométrie du granulat fin et le fuseau normalisé (selon les normes CAN/CSA-A23.2-2A et CAN/CSA-A23.1) sont présentés à la figure 4.1 et 4.2 et au tableau 4.3.

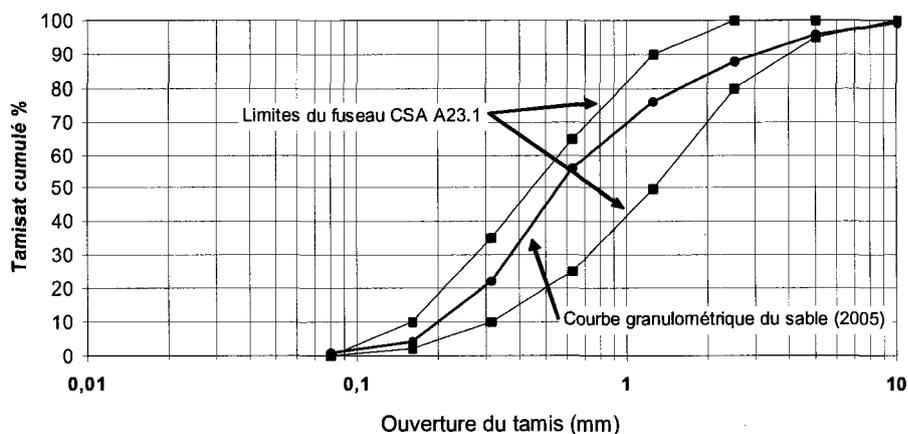


Figure 4.1 – Courbe granulométrique du granulat fin et fuseau normalisé (2005)

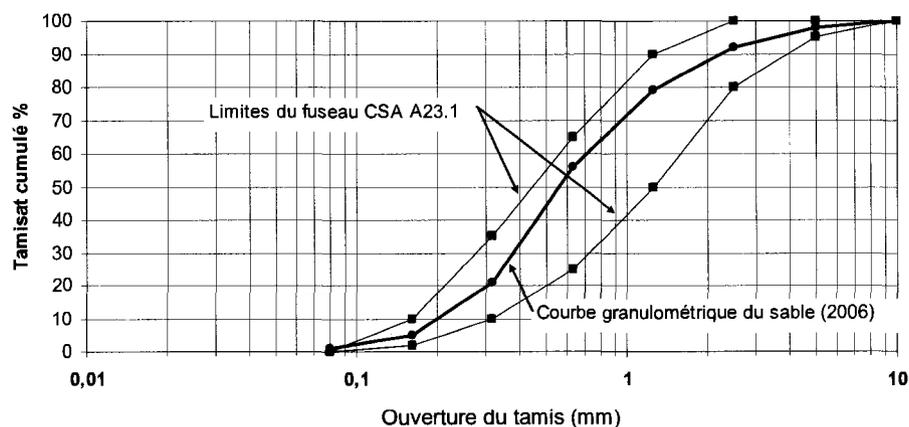


Figure 4.2 – Courbe granulométrique du granulat fin et fuseau normalisé (2006)

Tableau 4.3 – Granulométrie du granulat fin et le fuseau normalisé

Ouverture des tamis (mm)	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080
Tamisat cumulé 2005 (%)	99	96	88	76	56	22	4	1
Tamisat cumulé 2006 (%)	100	98	92	79	56	21	5	1
Fuseau normalisé (%)	100	95-100	80-100	50-90	25-65	10-35	2-10	-

Les granulats fins utilisés en usine proviennent de Joliette et Ste-Émilie-de-l'Énergie et respectent les fuseaux normalisés.

4.1.3.2 Gros granulats

Les gros granulats utilisés pour la fabrication des bétons en laboratoire proviennent de la région de Sherbrooke. Seuls les mélanges L-30-SA-XX et L-30-SA-XX_L ont été fabriqués avec de la pierre ayant une grosseur maximum de 14 mm de diamètre, les autres mélanges ont été fabriqué avec de la pierre 20 mm maximum. Les figures 4.3 et 4.4, ainsi que les tableaux 4.4 et 4.5, représentent les courbes granulométriques des gros granulats de 14 mm et 20 mm ainsi que les fuseaux normalisés.

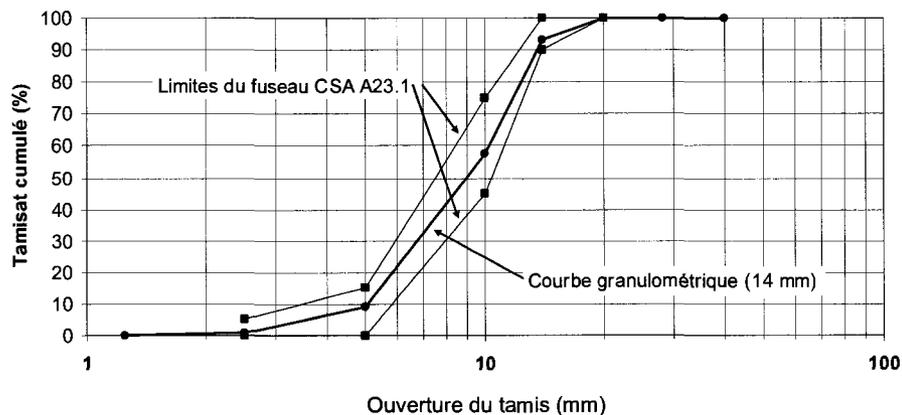


Figure 4.3 – Courbe granulométrique du gros granulat (14 mm) et fuseau normalisé

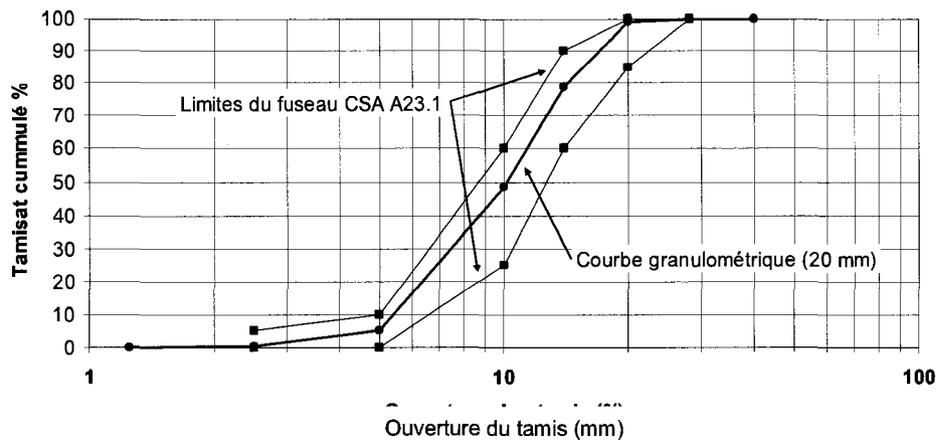


Figure 4.4 – Courbe granulométrique du gros granulat (20 mm) et fuseau normalisé

Tableau 4.4 – Granulométrie du gros granulat (14 mm) et le fuseau normalisé

Ouverture des tamis (mm)	40	28	20	14	10	5	2,5	1,25
Tamisat cumulé (%)	100	100	100	93	58	9	1	1
Fuseau normalisé (%)	-	-	-	90-100	45-75	0-15	0-5	-

Tableau 4.5 – Granulométrie du gros granulat (20 mm) et le fuseau normalisé

Ouverture des tamis (mm)	40	28	20	14	10	5	2,5	1,25
Tamisat cumulé (%)	100	100	99	70	42	5	1	1
Fuseau normalisé (%)	-	-	85-100	60-90	25-60	0-10	0-5	-

Le gros granulat utilisé en usine est une pierre ayant un diamètre maximal de 20 mm et provient de la carrière de Demix Agrégats à la carrière de Varennes. Celle-ci respecte le fuseau normalisé.

4.1.4 Adjuvants

Quatre types d'adjuvants ont été utilisés. Pour l'ensemble des mélanges avec air entraîné, laboratoire et usine confondus, l'agent entraîneur d'air est dérivé d'acides gras et sulfoniques solubles à l'eau nommé Airextra.

Le second adjuvant est un réducteur d'eau – renforçateur de résistance, composé d'acide hydroxycarboxiliques et d'un catalyseur permettant une hydratation plus complète du liant. Le Eucon DX a été utilisé dans les bétons de series L-35-AE et C-35-AE.

Un deuxième réducteur d'eau a été utilisé dans les bétons des séries L-30-SA, L-25-AE, L-25-SA, C-25-AE et C-25-SA. Ce composé de lignosulfonates se nomme Eucon WR.

Le troisième réducteur d'eau est à base de plastifiants de moyenne portée. Le Eucon MRC contient des ions de chlorures qui peuvent limiter son utilisation. Il a été utilisé dans les bétons de la série C-30-SA.

Le tableau 4.6 indique les principales caractéristiques des différents adjuvants.

Tableau 4.6 – Caractéristiques des différents adjuvants

Caractéristiques	Airextra	Eucon DX	Eucon WR	Eucon MRC
Densité relative à 25°C	1	1,15	1,21	1,27
Solides (%)	10,50	28,5	40,5	43,5
Valeur du pH	10	8,5	7,0	5,75
Couleur	Brun transparent	Brun transparent	Brun foncé	Brun foncé
Ions chlorures (g/mL)	Aucun	Aucun	Aucun	0,119

4.2 Mélanges

4.2.1 Bétons en laboratoire

Six séries de bétons ont été fabriquées et caractérisées en laboratoire. La première série comprend des bétons à air entraîné de 35 MPa à 28 jours (L-35-AE-XX). Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport eau/liant apparent de 0,41 en utilisant un liant constitué à 75% de ciment Portland normal (GU) et à 25% de ciment mélangé avec fumée de silice (GUb-SF). La dimension maximale du gros granulat est de 20 mm. Tous les bétons contiennent un agent entraîneur d'air et un agent réducteur d'eau. Cette série de bétons comporte un béton de référence (L-35-AE-00) produit avec de l'eau potable (sans eau recyclée). Les quatre autres bétons contiennent des quantités variables d'eau recyclée.

Les deuxième et troisième séries regroupent des bétons sans air entraîné de 30 MPa à 28 jours (L-30-SA-XX). Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport eau/liant

apparent de 0,58 et un ciment Portland normal (GU). La dimension maximale du gros granulat est de 14 mm. Tous les bétons contiennent un agent réducteur d'eau. Cette seconde série de bétons comporte un béton de référence (L-30-SA-00) produit avec de l'eau potable (sans eau recyclée) ainsi que quatre autres bétons contenant des quantités variables d'eau recyclée (liquide et solide). Une autre série a été fabriquée (L-30-SA-XX_L) avec une formulation identique à la précédente à l'exception que les solides de l'eau recyclée ont été soustraits et remplacés par le liquide de l'eau recyclée.

Les quatrième et cinquième séries regroupent des bétons avec air entraîné de 25 MPa à 28 jours (L-25-AE-XX). Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport eau/liant apparent de 0,60 et un ciment Portland normal (GU). La dimension maximale du gros granulat est de 20 mm. Tous les bétons contiennent un agent entraîneur d'air et un agent réducteur d'eau. Cette série comporte un béton de référence (L-25-AE-00) produit avec de l'eau potable (sans eau recyclée) ainsi que quatre autres bétons contenant des quantités variables d'eau recyclée (liquide et solide). Une autre série (L-25-AE-XX_S) a été fabriquée avec une formulation identique à la précédente à l'exception que le liquide de l'eau recyclée a été remplacé par de l'eau potable.

La dernière série regroupe des bétons sans air entraîné de 25 MPa à 28 jours (L-25-SA-XX). Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport eau/liant apparent de 0,67 et un ciment Portland normal (GU). La dimension maximale du gros granulat est de 20 mm. Tous les bétons contiennent un agent réducteur d'eau. Cette série comporte un béton de référence (L-25-SA-00) produit avec de l'eau potable (sans eau recyclée) ainsi que quatre autres bétons contenant des quantités variables d'eau recyclée (liquide et solide).

Pour chaque série, les proportions d'eau potable et d'eau recyclée ont été ajustées de manière à produire des eaux de gâchage ayant des teneurs en solides en suspension de 30 000, 50 000, 75 000 et 100 000 ppm. Les formulations détaillées sont présentées aux tableaux 4.7 à 4.12.

Tableau 4.7 – Formulation des bétons de la série L-35-AE-XX

Béton	L-35-AE-00	L-35-AE-30	L-35-AE-50	L-35-AE-75	L-35-AE-100
Solides (ppm)	0	30000	50000	75000	100000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	173	125	97	57	16
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	42	71	107	142
Fines (kg/m ³)	0	5	9	13	18
Ciment (kg/m ³)	424	421	432	434	432
Sable (kg/m ³)	778	776	793	795	792
Pierre (kg/m ³)	965	957	983	986	982
AEA (ml/100kg c)	75	75	75	75	75
R.E. (ml/100kg c)	387	387	387	387	387
E/Lap	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
E/Lréel		0,40	0,39	0,38	0,37

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.8 – Formulation des bétons de la série L-30-SA-XX

Béton	L-30-SA-00	L-30-SA-30	L-30-SA-50	L-30-SA-75	L-30-SA-100
Solides (ppm)	0	30000	50000	75000	100000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	202	150	111	64	19
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	50	49	124	166
Fines (kg/m ³)	0	6	10	15	21
Ciment (kg/m ³)	351	355	352	354	355
Sable (kg/m ³)	1088	1097	1088	1093	1096
Pierre (kg/m ³)	647	655	649	652	654
AEA (ml/100kg c)	0	0	0	0	0
R.E. (ml/100kg c)	245	245	245	245	245
E/Lap	0,58	0,58	0,58	0,57	0,58
E/Lréel		0,56	0,55	0,53	0,52

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.9 – Formulation des bétons de la série L-30-SA-XX_L

Béton	L-30-SA-00 _L	L-30-SA-30 _L	L-30-SA-50 _L	L-30-SA-75 _L	L-30-SA-100 _L
Solides (ppm)	0	30000	50000	75000	100000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	207	151	112	65	19
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	56	94	140	188
Fines (kg/m ³)	0	0	0	0	0
Ciment (kg/m ³)	358	358	358	355	357
Sable (kg/m ³)	1104	1105	1107	1097	1104
Pierre (kg/m ³)	659	660	660	655	659
AEA (ml/100kg c)	0	0	0	0	0
R.E. (ml/100kg c)	245	245	245	245	245
E/Lap	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
E/Lréel		0,58	0,58	0,58	0,58

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.10 – Formulation des bétons de la série L-25-AE-XX

Béton	L-25-AE-00	L-25-AE-30	L-25-AE-50	L-25-AE-75	L-25-AE-100
Solides (ppm)	0	30000	50000	75000	100000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	159	119	92	61	21
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	37	63	95	126
Fines (kg/m ³)	0	5	8	12	16
Ciment (kg/m ³)	267	271	273	275	272
Sable (kg/m ³)	908	920	928	934	926
Pierre (kg/m ³)	921	934	942	948	939
AEA (ml/100kg c)	113	113	113	113	113
R.E. (ml/100kg c)	506	506	506	506	506
E/Lap	0,60	0,60	0,60	0,61	0,60
E/Lréel		0,58	0,57	0,57	0,54

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.11 – Formulation des bétons de la série L-25-AE-XX_s

Béton	L-25-AE-00s	L-25-AE-30s	L-25-AE-50s	L-25-AE-75s	L-25-AE-100s
Solides (ppm)	0	30000	50000	75000	100000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	159	159	148	154	150
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	0	0	0	0
Fines (kg/m ³)	0	5	8	12	17
Ciment (kg/m ³)	267	275	262	279	280
Sable (kg/m ³)	908	936	891	947	952
Pierre (kg/m ³)	921	950	904	961	966
AEA (ml/100kg c)	113	113	113	113	113
R.E. (ml/100kg c)	506	506	506	506	506
E/Lap	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
E/Lréel		0,58	0,56	0,55	0,54

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.12 – Formulation des bétons de la série L-25-SA-XX

Béton	L-25-SA-00	L-25-SA-30	L-25-SA-50	L-25-SA-75	L-25-SA-100
Solides (ppm)	0	30000	50000	75000	100000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	176	130	99	62	23
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	42	68	103	138
Fines (kg/m ³)	0	4	8	13	17
Ciment (kg/m ³)	264	264	264	267	267
Sable (kg/m ³)	987	988	986	999	999
Pierre (kg/m ³)	938	938	937	949	949
AEA (ml/100kg c)	0	0	0	0	0
R.E. (ml/100kg c)	506	506	506	506	506
E/Lap	0,67	0,67	0,66	0,67	0,67
E/Lréel		0,65	0,63	0,62	0,60

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Ces quatre formulations de béton ont été recommandées par le fabricant car ce sont des formulations très en demande. Les dosages en adjuvant ont été déterminés par le fabricant de béton à partir des recommandations du fournisseur d'adjuvants.

Le béton de 35 MPa est généralement utilisé lors de la fabrication de trottoirs de béton. L'affaissement exigé pour ce type d'ouvrage est de 80 ± 30 mm avec 5 à 8% d'air entraîné et un temps de prise d'environ 7 heures.

Le béton de 30 MPa est généralement utilisé lors de la fabrication de dalles structurales. L'affaissement exigé pour ce type d'ouvrage est de 80 ± 30 mm avec air occlus et un temps de prise d'environ 7 heures.

Les bétons de 25 MPa avec et sans air entraîné sont généralement utilisés lors de la fabrication respectivement de murs de fondation et dalle sur sol. L'affaissement exigé pour ces types d'ouvrages est de 80 ± 30 mm avec 5 à 8% d'air entraîné pour les murs de fondation et un temps de prise d'environ 7 heures.

4.2.2 Bétons d'usine

Quatre séries de béton ont été fabriquées en usine. La première série regroupe des bétons à air entraîné de 35 MPa à 28 jours (C-35-AE-XX). Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport eau/liant apparent de $0,42 \pm 0,01$ et un liant composé à 50% de ciment GU et à 50% de ciment GUb-SF. Les dosages en eau ont été ajustés en usine de manière à produire des affaissements de 100 ± 20 mm. Les bétons de cette série contiennent un adjuvant réducteur d'eau et un agent entraîneur d'air.

La seconde série de mélanges (C-30-SA-XX) comprend des bétons sans air entraîné de 30 MPa à 28 jours. Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport eau/liant apparent de $0,50 \pm 0,02$ et un ciment Portland normal (GU). Les dosages en eau ont été ajustés en usine de manière à produire des affaissements de 80 ± 20 mm.

Les deux autres séries de mélanges regroupent des bétons de 25 MPa avec (C-25-AE) et sans air entraîné (C-25-SA). Les rapports eau/liant apparents des bétons avec et sans air entraîné sont de $0,55 \pm 0,01$ et de $0,63 \pm 0,02$ respectivement. Les bétons de la série C-25-AE-XX sont fabriqués avec un liant constitué à 75% de ciment GU et à 25% de laitier de haut fourneau. Ceux de la série

C-25-SA-XX sont fabriqués avec un liant constitué à 85% de ciment GU et à 15% de laitier. Les dosages en eau ont été ajustés en usine de manière à produire des affaissements de 80 ± 10 mm. Ces deux séries de béton contiennent un agent réducteur d'eau.

Le dosage des bétons en usine n'est pas aussi précis que celui des bétons produits en laboratoire. Par exemple, en usine, il est plus difficile de connaître précisément la quantité totale d'eau de gâchage en raison de la variation de l'humidité des granulats. En effet, d'importantes variations de température et d'humidité des granulats peuvent se produire à l'intérieur d'une plage de temps de quelques heures. Ces variations peuvent avoir des effets sur l'affaissement, la teneur en air, le temps de prise et le ressuage. Pour minimiser les effets de ce type de variations sur les propriétés des bétons frais, et pour pouvoir mieux évaluer l'effet de l'eau recyclée, toutes les productions de béton avec eau recyclée ont été immédiatement précédées d'une production d'un béton de référence ne contenant pas d'eau recyclée. Les formulations des bétons de référence, produits juste avant chaque béton avec eau recyclée, sont présentées aux tableaux 4.13 à 4.16. Tous les bétons de référence ont été soumis aux mêmes essais de caractérisation que ceux utilisés pour les bétons avec eau recyclée. Les différences entre les résultats avec et sans eau recyclée sont alors plus fortement gouvernées par la quantité d'eau recyclée que par les variations horaires d'humidité des granulats et de température des matériaux.

Tous les bétons d'usine ont été fabriqués avec un gros granulat de 20 mm de dimension maximale. Les Tableaux 4.13 à 4.16 présentent les formulations détaillées de tous les bétons fabriqués en usine.

Tableau 4.13 – Formulation des bétons de la série C-35-AE-XX

Béton	C-35-AE-23		C-35-AE-36		C-35-AE-46		C-35-AE-51	
Solides (ppm)	0	23 000	0	36 000	0	46 000	0	51 000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	165	98	165	100	168	93	167	47
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	68	0	64	0	67	0	112
Fines (kg/m ³)	0	4	0	6	0	8	0	9
Ciment (kg/m ³)	400	399	404	402	400	401	399	399
Sable (kg/m ³)	792	804	792	814	802	806	797	799
Pierre (kg/m ³)	906	899	896	883	885	887	884	895
AEA (ml/100kg c)	95	95	85	85	90	90	95	95
R.E. (ml/100kg c)	230	230	230	230	230	230	230	230
E/Lap	0,41	0,43	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
E/Lréel		0,42		0,41		0,40		0,40

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.14 – Formulation des bétons de la série C-30-SA-XX

Béton	C-30-SA-21		C-30-SA-33		C-30-SA-34		C-30-SA-45		C-30-SA-49	
Solides (ppm)	0	21000	0	33000	0	34000	0	45000	0	49000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	181	114	175	140	178	138	180	125	177	145
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	70	0	29	0	30	0	45	0	24
Fines (kg/m ³)	0	4	0	6	0	6	0	8	0	9
Ciment (kg/m ³)	351	351	351	351	348	349	362	363	361	361
Sable (kg/m ³)	908	914	900	898	905	905	881	879	886	885
Pierre (kg/m ³)	919	912	923	912	923	922	922	923	907	919
AEA (ml/100kg c)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R.E. (ml/100kg c)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
E/Lap	0,52	0,54	0,50	0,50	0,51	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49
E/Lréel		0,52		0,48		0,48		0,47		0,47

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.15 – Formulation des bétons de la série C-25-AE-XX

Béton	C-25-AE-36		C-25-AE-42		C-25-AE-47	
Solides (ppm)	0	36000	0	42000	0	47000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	157	123	163	117	159	116
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	33	0	39	0	38
Fines (kg/m ³)	0	6	0	7	0	8
Ciment (kg/m ³)	288	289	299	300	287	290
Sable (kg/m ³)	937	939	932	927	935	939
Pierre (kg/m ³)	921	902	907	907	920	908
AEA (ml/100kg c)	37	37	32	32	37	37
R.E. (ml/100kg c)	250	250	310	310	250	250
E/Lap	0,55	0,56	0,55	0,54	0,55	0,56
E/Lréel		0,54		0,52		0,53

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

Tableau 4.16 – Formulation des bétons de la série C-25-SA-XX

Béton	C-25-SA-55		C-25-SA-58		C-25-SA-67	
Solides (ppm)	0	55000	0	58000	0	67000
Eau Aq ¹ (kg/m ³)	178	139	174	133	176	97
Eau Rc ² (kg/m ³)	0	35	0	33	0	66
Fines (kg/m ³)	0	10	0	10	0	12
Ciment (kg/m ³)	283	283	283	283	282	282
Sable (kg/m ³)	967	960	964	962	966	962
Pierre (kg/m ³)	887	893	897	901	911	896
AEA (ml/100kg c)	0	0	0	0	0	0
R.E. (ml/100kg c)	250	250	250	250	250	250
E/Lap	0,63	0,65	0,61	0,62	0,62	0,62
E/Lréel		0,61		0,59		0,58

1. Eau Aq : eau potable
2. Eau Rc : eau recyclée

4.3 Procédures expérimentales

4.3.1 Procédures d'essais en laboratoire

Les bétons de laboratoire ont été produits dans un malaxeur à toupie à vitesse variable d'une capacité de 100 litres. Les bétons de la série L-35-AE ont été produits avec des gâchées de 200 kg (80 litres) et les séries L-30-SA-XX, L-30-SA-XX_L, L-25-AE-XX, L-25-AE-XX_S et L-25-SA-XX ont été respectivement produites avec des gâchées de 150 kg (60 litres). Les mesures d'affaissement (CSA A23.2-5C), du volume d'air entraîné (CSA A23.2-4C) et de la température ont été réalisées à partir d'échantillons de bétons frais, prélevés à 10, 23, 53 et 83 minutes après le premier

contact eau ciment. Ces essais sont basés sur la procédure expérimentale développée par Pigeon et Coll. [1992] Le temps de prise et le ressuage ont été effectués selon les normes ASTM C403 et ASTM C232 respectivement. Les résistances à la compression (CSA A23.2-9C) ont été mesurées après 24 heures, 7 et 28 jours de mûrissement humide. Les bétons de la série L-35-AE-XX ont été soumis à des essais accélérés de durabilité aux cycles de gel-dégel selon les normes d'essai ASTM C666 (résistance à la fissuration interne) et NQ 2621-900 (résistance à l'écaillage dû aux sels de déglçage). Les échantillons de gel-dégel et d'écaillage ont été prélevés 80 min après le contact eau ciment. Les échantillons pour les essais de résistance à la compression ont été prélevés, quant à eux, 23 min après le contact eau ciment.

Manipulations en laboratoire

La même procédure a été utilisée pour tous les bétons fabriqués en laboratoire :

1. Introduire le sable
2. Malaxer 1 min. (19 tours/min)
3. Mesurer la teneur en eau
 - Correction si nécessaire
4. Introduire :
 - Pierre
 - 50% eau
 - Agent entraîneur d'air
5. Malaxer 1 min (19 tours/min)
6. Introduire :
 - Ciment
 - 50% eau
 - Agent réducteur d'eau
7. Malaxer 3 min (19 tours/min)
8. Pause 1 min
9. Malaxer (1 tour/min)

À tous les 10, 23, 53 et 83 minutes les essais suivants ont été faits ainsi que la prise d'échantillons afin de faire les essais sur le béton durci.

À 10 min

Essais : Affaissement
 Teneur en air
 Température
 Masse volumique

Échantillons : 1 cylindre 100x200 mm

À 23 min

Essais : Affaissement
 Teneur en air
 Température
 Masse volumique

Échantillons : 10 cylindres 100x200 mm

À 53 min

Essais : Affaissement
 Teneur en air
 Température
 Masse volumique

Échantillons : 1 cylindre 100x200 mm

À 83 min

Essais : Affaissement
 Teneur en air
 Température
 Masse volumique

Échantillons : 1 cylindre 100x200 mm
 2 cylindres 150x300 mm
 2 75x75x350 mm
 2 255 mm x 230 mm

4.3.2 Procédures d'essais en usine

Les bétons d'usine ont été produits en centrale fixe en utilisant des gâchées de 5 m³ à 7,5 m³. L'échantillonnage des bétons a été effectué à l'extrémité de la chute du camion malaxeur, juste avant le départ du camion de la centrale à béton. Pour chaque béton, l'affaissement (CSA A23.2-5C), le volume d'air (CSA A23.2-4C), la température, le temps de prise (ASTM C403) et le ressuage (ASTM C232) ont été mesurés. Des cylindres de béton (100 x 200 mm) ont été fabriqués pour mesurer la résistance à la compression après 24 heures, 7 jours et 28 jours de mûrissement humide. Des éprouvettes ont été fabriquées à l'usine pour évaluer la durabilité aux cycles de gel-dégel de certains bétons de la série C-35-AE-XX. L'ensemble des échantillons a été prélevé environ 20 min après le contact eau-ciment.

5 Présentation des résultats

5.1 Phase I : Caractérisation physico-chimique des eaux recyclées

5.1.1 Mesures en continu à l'intérieur du bassin d'agitation à l'usine

Les figures 5.1 et 5.2 illustrent la variation journalière de la densité à l'intérieur du bassin de ville LaSalle. Ces figures démontrent l'importante variation au cours d'une journée achalandée au recycleur à béton frais. La concentration augmente lorsqu'un retour de béton frais et/ou les eaux de lavage des bétonnières sont acheminés à l'intérieur du bassin d'homogénéisation. La diminution de la concentration est due à l'ajout d'eau de l'aqueduc à l'intérieur du bassin.

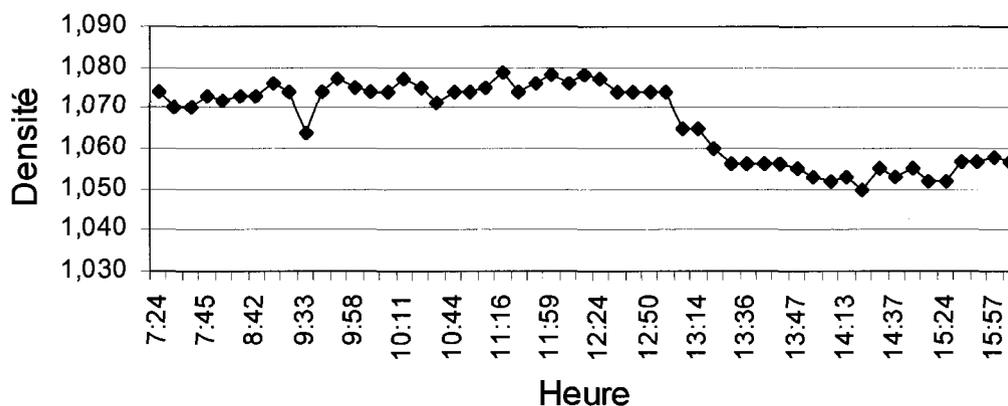


Figure 5.1 – Variation de la densité dans le bassin au cours du 28 mars 2006

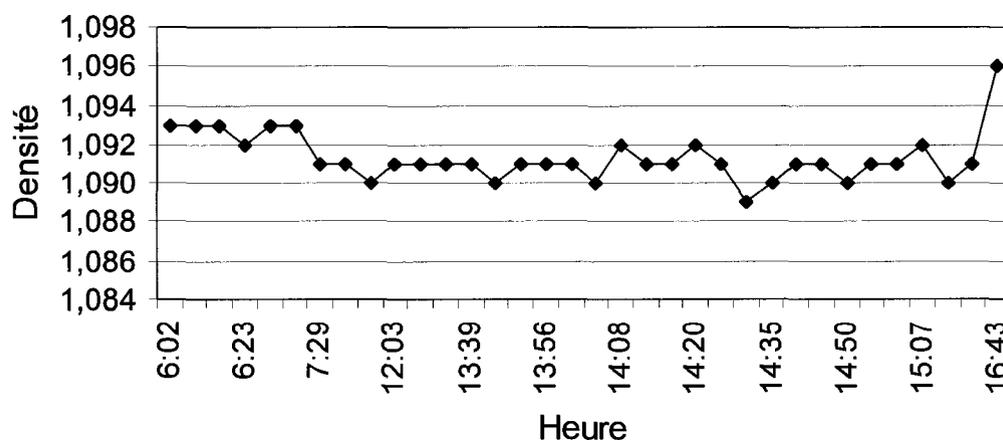


Figure 5.2 – Variation de la densité dans le bassin au cours du 22 juin 2006

Une variation aussi importante est observée mensuellement. La figure 5.3 indique la variation de la densité et de la température au cours du mois d'avril. Ces valeurs ont été prises entre 12 h 04 et 12 h 36. Cette figure est représentative de la variation mensuelle.

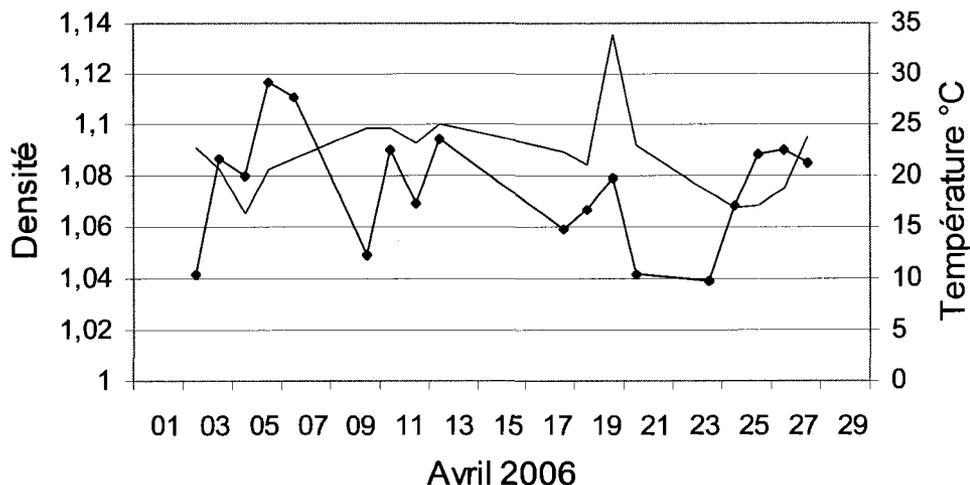


Figure 5.3 – Variation de la densité et de la température au cours du mois d'avril

La variation annuelle est tout aussi dépendante de l'achalandage du recycleur à béton frais. Il est donc difficile de prévoir les variations journalières, mensuelles ou annuelles. Il faut donc avoir un contrôle en continu de la densité et de la température à l'intérieur du bassin et ainsi ajouter de l'eau potable au besoin.

Le tableau 5.1 indique la densité minimale et la densité maximale à chaque mois de l'année 2006. Le bassin n'a pas été utilisé durant le mois de janvier et février. La densité a varié de 1,000 à 1,205 au cours de l'année 2006.

Tableau 5.1 – Densité minimale et maximale mensuelle pour l'année 2006

mois	Densité	
	min	max
janvier	-	-
février	-	-
mars		1,144
avril	1,001	1,130
mai	1,003	1,189
juin	1,004	
juillet	1,004	1,103
août	1,016	1,112
septembre	1,016	1,106
octobre	1,027	1,125
novembre	1,011	1,166
decembre	1,029	1,124

5.1.2 Analyse chimique de l'eau recyclée à partir d'échantillonnages ponctuels

Le tableau 5.2 résume les résultats d'analyses chimiques effectuées de façon ponctuelle sur l'eau recyclée à l'intérieur du bassin de ville LaSalle. Les cases grises représentent la valeur maximale ou minimale de chacune des analyses. L'analyse du pH n'a pas été effectuée systématiquement sur chaque échantillon. L'analyse de l'échantillon du 1^{er} juin 2005 (en bleu) correspond à l'eau recyclée utilisée dans les laboratoires de béton de l'Université de Sherbrooke dans le cadre de cette recherche.

Tableau 5.2 – Résultats d'analyse chimique de l'eau recyclée à partir d'échantillons ponctuels

Date d'échantillonnage	Densité g/mL	Solides totaux (105°C) mg/L	pH (20°)	Chlorures mg/L	Sulfates mg/L	K ₂ O mg/L	Na ₂ O mg/L
17 mars 2004	1,10	62 000	12,7	< 4,0	< 10	600	140
20 avr. 2004	1,10	154 000	12,7	8	2,2	988	229
21 sept. 2004	1,05	40 800	12,6	15	< 2,0	366	332
28 sept. 2004	1,03	33 000	12,0	15	< 2,0	1320	343
29 oct. 2004	1,02	31 800	11,7	271	273	148	178
1 juin 2005		110 000		26	8,1	760	200
23 mars 2005	1,06	33 900	12,4	134	88,3	414	154
25 oct. 2005	0,99	1 300	12,4	50	38,3	73,8	53
23 mars 2006	1,02	5 157		44	<0,5	140	54
25 mai 2006	1,06	71 175		10	<0,5	460	92
25 août 2006	1,04	11 000		20	10,5	210	43

5.1.3 Analyse physico-chimique des solides en suspension

Afin de comprendre les effets de l'utilisation des solides de l'eau recyclée, les propriétés physiques et chimiques des solides ont été caractérisées par la diffraction des rayons X, par la granulométrie laser et par la fluorescence X.

5.1.3.1 Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X permet de faire une analyse qualitative des phases cristallines. Ainsi chaque spectre résultant est la somme des diffractions correspondant à chaque espèce. Il est donc possible d'identifier les espèces en connaissant les raies de diffraction caractéristiques de chaque espèce pure. Les résultats des analyses de diffraction aux rayons X ont été faits à l'*Institut des Matériaux et Systèmes Intelligents (IMSI)* de l'université de Sherbrooke.

La première analyse sur l'ensemble des particules fines inférieures à 45 µm démontre une quantité significative de portlandite (Ca(OH)₂) et de bélite (Ca₂SiO₂) qui proviennent du ciment Portland hydraté et/ou non hydraté. Les solides de l'eau recyclée sont aussi composés en majeure partie de quartz (SiO₂), de calcite (CaCO₃), de dolomie (CaMg(CO₃)₂) et de corundum (Al₂O₃) provenant des granulats. D'autres minéraux ont été identifiés en faibles quantités.

La seconde analyse a été effectuée sur le dépôt des solides à l'intérieur d'un baril de 200 litres. Ce sont les mêmes particules qui se sont déposées en trois couches

distinctes. La partie supérieure est visqueuse et est constituée de particules fines gorgées d'eau qui s'agglomèrent. La partie centrale est très dense et très dure. La couche inférieure est granuleuse et les particules se dissocient facilement. Les figures suivantes sont les résultats de l'analyse de diffraction des rayons X fait par l'IMSI.

La figure 5.4 représente la partie supérieure des solides décantés. Cette section est constituée principalement de calcite, de portlandite, de gypse et d'ettringite. Il est possible d'observer une partie amorphe qui est représentée par la courbe convexe de la ligne de base entre 20 et 40 degrés 2 thêta.

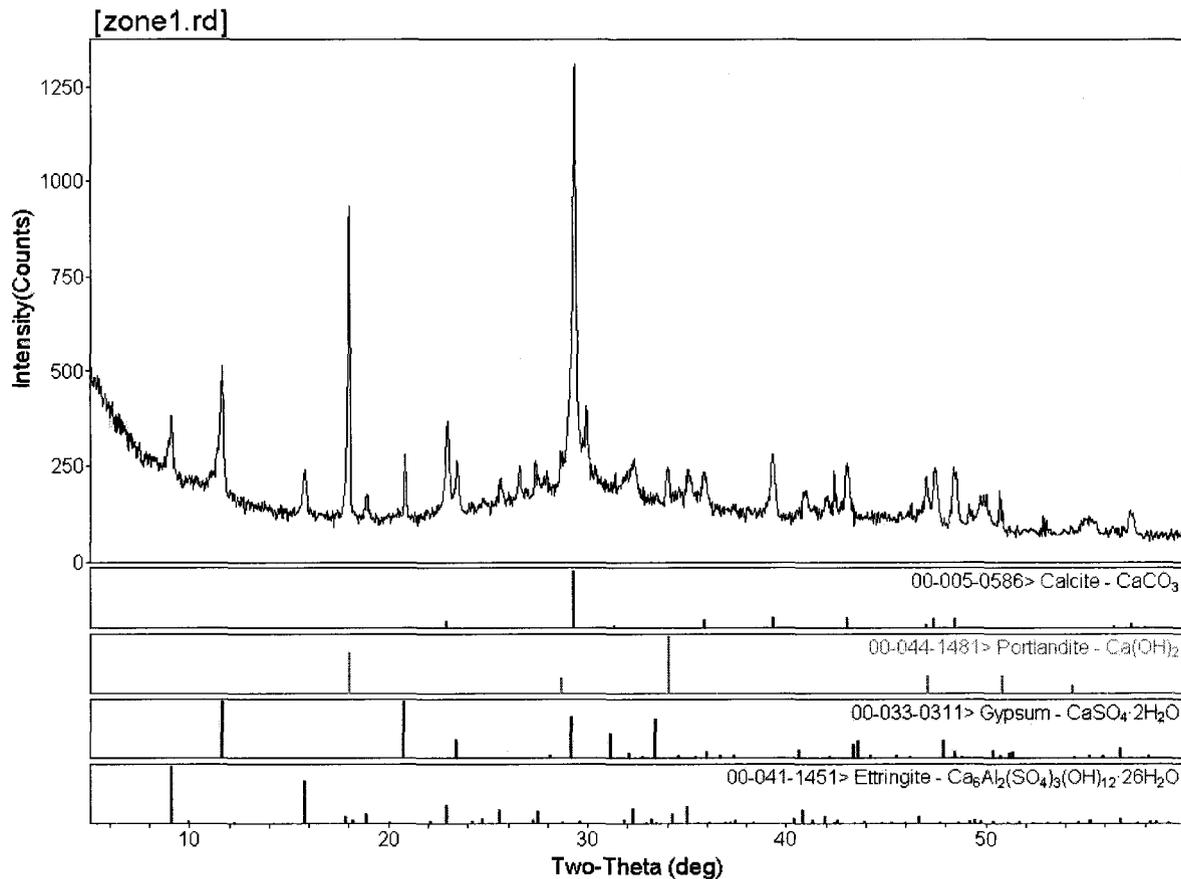


Figure 5.4 – DRX de la section supérieure des solides décantés

La figure 5.5 représente la partie centrale des solides décantés. Elle est constituée principalement de portlandite, et d'une faible quantité de gypse, d'ettringite, de calcite et de quartz.

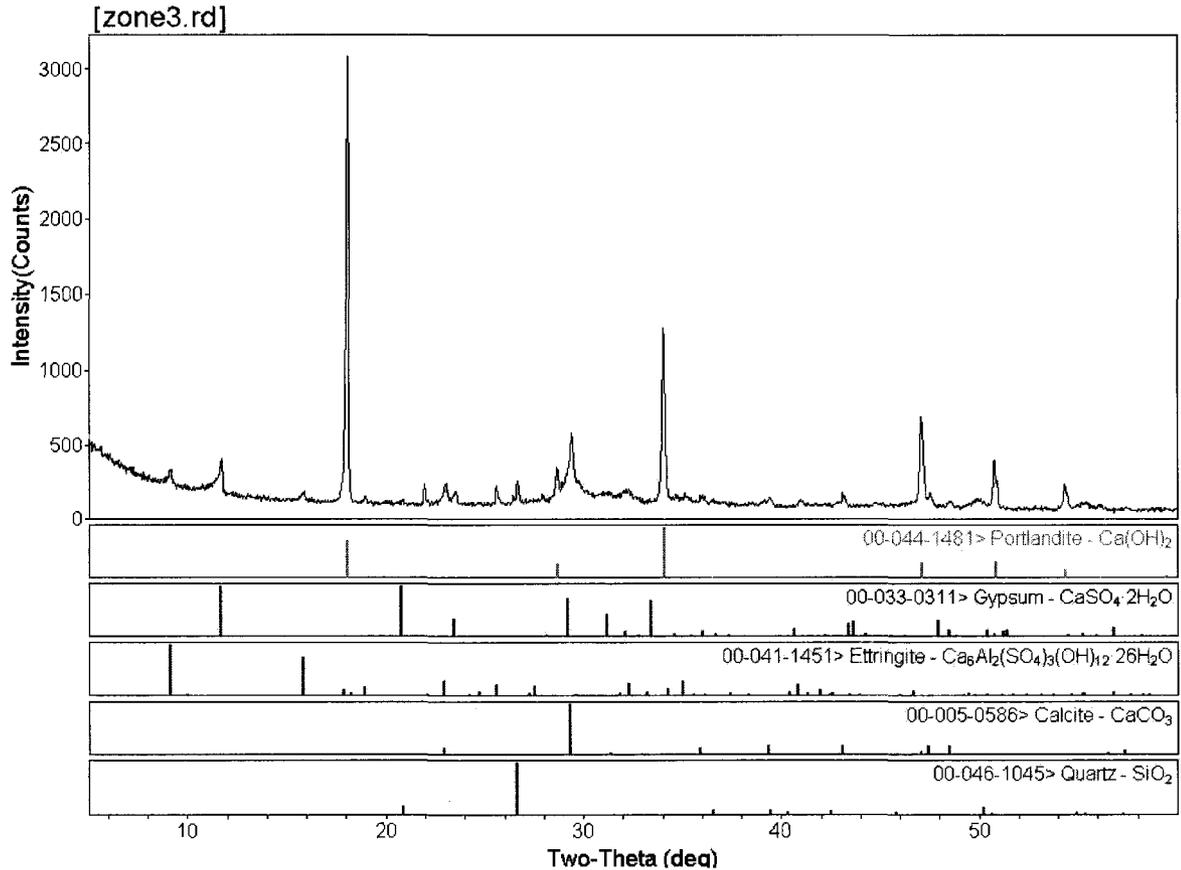


Figure 5.5 – DRX de la section centrale des solides décantés

La figure 5.6 représente le résultat de l'analyse de diffraction des rayons X de la partie inférieure des solides décantés. Cette partie est constituée de quartz, de portlandite, d'un peu de calcite et de feldspath. Il reste un pic non identifié situé à 11 degrés 2 thêta.

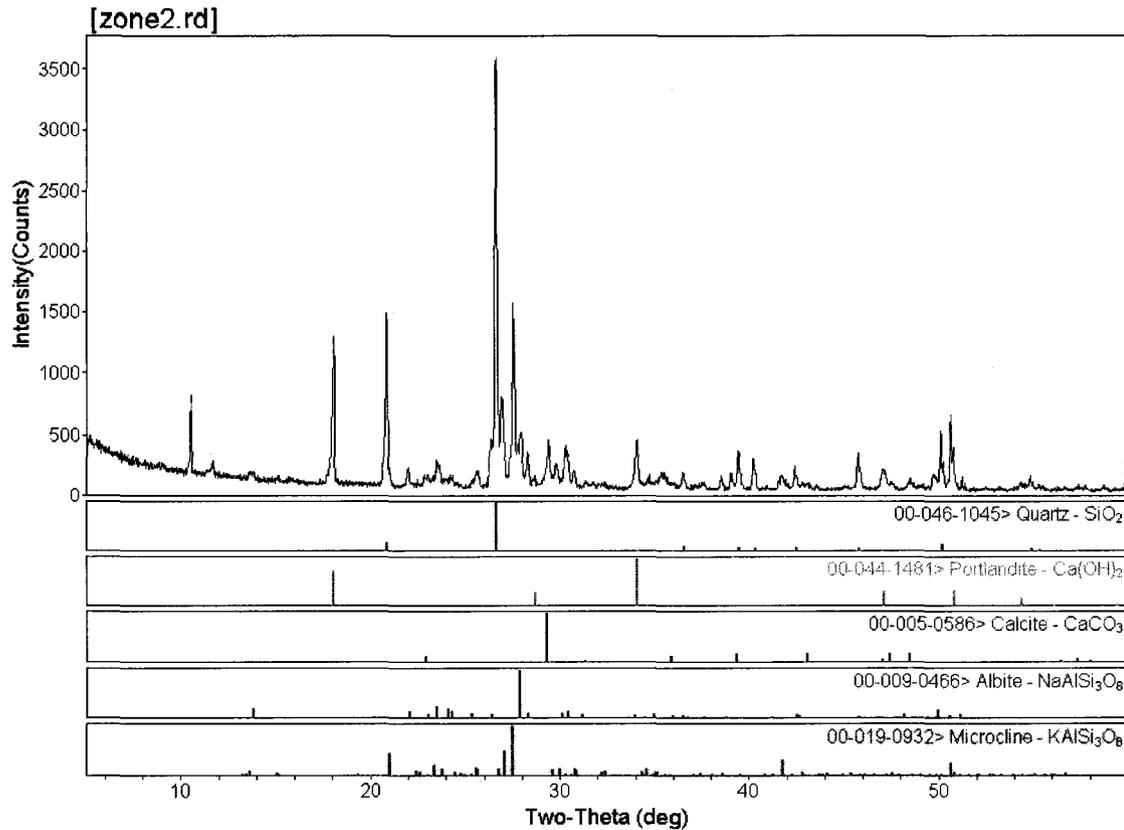


Figure 5.6 – DRX de la section inférieure des solides décantés

5.1.3.2 Granulométrie laser

La dimension des particules solides de l'eau recyclée varie de 1 µm à 350 µm. La dimension moyenne est de 8,93 µm et la surface spécifique est de 9899 cm²/cm³.

5.1.3.3 Fluorescence X

Cette technique permet de faire l'analyse chimique des solides de l'eau recyclée en déterminant la proportion (%) des principaux oxydes. Le tableau 5.3 indique les différents oxydes que l'on retrouve dans les solides de l'eau recyclée et, à titre indicatif, ceux que l'on retrouve dans un ciment de type 10 et de type 30.

Tableau 5.3 – Oxydes des solides de l'eau recyclée, du ciment type 10 et du ciment type 30 à partir de la fluorescents X

Oxydes	Solides de l'eau recyclée	Type 10	Type 30
SiO ₂	30,37	21	19,5
Al ₂ O ₃	6,47	4,2	4,7
Fe ₂ O ₃	2,14	3,1	2
CaO	36,47	62	63,8
MgO	1,98	2,9	2
SO ₃	1,75	—	—
K ₂ O	1,07	—	—
Na ₂ O	0,64	—	—
CL	0,03	—	—
TiO ₂	0,31	—	—
P ₂ O ₅	0,12	—	—
SrO	0,06	—	—
Mn ₂ O ₃	0,05	—	—
Cr ₂ O ₃	0,00	—	—
ZnO	0,01	—	—
LOI	18,53	2,5	1,5
Diamètre moyen (µm)	9,00	17	11
Surface spécifique	2,21	3,14	3,15

Le tableau permet de mettre en évidence le pourcentage plus élevé de SiO₂ ainsi que le pourcentage moins élevé de CaO des solides de l'eau recyclée comparativement aux pourcentages présent dans un ciment de type 10 ou de type 30.

Le pourcentage plus élevé de SiO₂ s'explique par la présence de sable et de particules de gros granulats dans l'eau recyclée. Le pourcentage du CaO est, quant à lui, moins élevé à l'intérieur de l'eau recyclée en raison de la carbonatation de celui-ci qui se produit lorsque l'eau recyclée est en attente à l'intérieur du bassin d'agitation.

De plus, cette analyse permet de mettre en évidence les particules de l'eau recyclée composées en grande partie de particules de ciment hydraté car le pourcentage de LOI est très élevé par rapport aux deux ciments.

5.2 Phase II : Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en laboratoire

5.2.1 Effet combiné

5.2.1.1 Propriétés des bétons frais et durcis

Les tableaux 5.4 à 5.7 résument les résultats obtenus lors des différents essais pour les quatre mélanges de béton fabriqués en laboratoire. Les résultats de l'essai de ressuage ne sont pas indiqués puisque pour l'ensemble des mélanges avec eau recyclée, il y a absence d'eau de ressuage.

Les mélanges L-35-AE-75 et L-35-AE-100 sont ombragés car la formulation de départ a été modifiée. Puisqu'à des concentrations supérieures à 75 000 ppm, le 35 MPa avait un affaissement nul, des adjuvants ont été ajoutés afin de le rendre plus fluide. Les résultats présentés ne sont donc pas fait à partir de la formulation de départ.

Tableau 5.4 – Résultats obtenus en laboratoire avec les bétons de 35 MPa

L-35-AE-XX	Température (°C)				Affaissement (mm)				Air (%)				Temps prise (heure)	Résistance à la compression (MPa)			Date
	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min		24h	7 jours	28 jours	
0 ppm	28	28	28	28	80	70	55	55	4,3	4,3	4,1	4,1	6 h 54	26,5	33,6	43,4	2005-07-19
30 000 ppm	28	28	27	26	55	45	30	20	4,4	4,2	4,0	4,0	6 h 02	25,9	32,2	42,2	2005-07-27
50 000 ppm	28	27	27	27	35	30	25	0	3,2	3,2	3,3	3,5	4 h 33	27,2	33,7	44,6	2005-07-26
Eucen 37 + 100ml d'eau																	
Eucen 37 + 100 ml d'eau																	

Tableau 5.5 – Résultats obtenus en laboratoire avec les bétons de 30 MPa

L-30-SA-XX	Température (°C)				Affaissement (mm)				Air (%)				Temps prise (heure)	Résistance à la compression (MPa)			Date
	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min		24h	7 jours	28 jours	
0 ppm	26	26	26	27	105	75	70	60	4,0	3,5	3,5	3,6	5 h 10	18,0	31,0	34,3	2005-06-27
30 000 ppm	27	27	27	27	95	85	70	80	3,0	3,0	3,0	3,1	4 h 24	19,4	31,5	35,7	2005-07-14
50 000 ppm	24	24	24	24	115	85	70	65	3,8	3,5	3,7	3,7	4 h 05	15,3	30,8	34,0	2005-07-07
75 000ppm	27	26	26	26	70	50	50	35	3,4	3,5	3,4	3,5		18,6	29,6	34,0	2005-08-01
100 000 ppm	25	25	24	24	55	50	45	45	3,2	3,5	3,5	3,6	2 h 52	19,4	31,7	35,5	2005-07-07

Malgré l'absence d'agent entraîneur d'air dans la formulation du 30 MPa, les bétons de cette série possèdent des teneurs en air comprises entre 3% et 4%. Ces valeurs,

relativement élevées pour une formulation sans agent entraîneur d'air, découlent du fort dosage en sable ($> 1000 \text{ kg/m}^3$) de ce type de béton.

Tableau 5.6 – Résultats obtenus en laboratoire avec les bétons de 25 MPa avec air entraîné

L-25-AE-XX	Température (°C)				Affaissement (mm)				Air (%)				Temps prise (heure)	Résistance à la compression (MPa)			Date
	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min		24h	7 jours	28 jours	
0 ppm	25	25	25	25	60	50	35	30	7,0	6,4	6,0	5,5	5 h 00	14		28	2006-08-04
30 000 ppm	27	27	26	26	40	40	30	20	6,2	6,0	5,5	5,0	4 h 00	14	22	28	2006-08-05
50 000 ppm	26	26	25	25	40	30	25	25	6,0	5,4	4,6	4,6	3 h 51	14	23	29	2006-08-05
75 000 ppm	25	25	26	25	20	20	20	20	4,7	4,6	4,3	4,1	3 h 20	14	25	29	2006-08-05
100 000 ppm	26	26	26	26	20	15	10	5	4,0	4,2	4,1	3,9	2 h 54	17	24	30	2006-08-05

Tableau 5.7 – Résultats obtenus en laboratoire avec les bétons de 25 MPa sans air entraîné

L-25-SA-XX	Température (°C)				Affaissement (mm)				Air (%)				Temps prise (heure)	Résistance à la compression (MPa)			Date
	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min		24h	7 jours	28 jours	
0 ppm	24	24	24	24	95	60	50	40	2,0	2,1	1,9	2,2	6 h 05	13	28	33	2006-08-09
30 000 ppm	26	25	25	25	40	40	35	25	2,7	2,7	2,2	2,7	4 h 23	15	26	31	2006-08-06
50 000 ppm	25	25	26	25	40	35	30	20	2,2	2,3	2,5	2,7	4 h 05	15	26	32	2006-08-06
75 000 ppm	26	25	25	25	30	25	15	15	2,3	2,2	2,3	2,0	3 h 42	14	25	31	2006-08-06
100 000 ppm	25	24	24	25	15	0	0	0	2,1	1,9	1,9	1,8	3 h 27	14	27	32	2006-08-09

5.2.1.2 Caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton durci

Le tableau 5.8 résume les caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton de 35 MPa tel que la teneur en air dans le béton frais et durci, la surface spécifique et le facteur d'espacement (\bar{L}) des bulles. Pour chaque teneur en solides, l'évolution des caractéristiques du réseau de bulles d'air est indiquée en fonction du temps de malaxage.

Tableau 5.8 – Caractéristiques du réseau de bulles d'air dans les bétons durci

L-35-AE-XX	Temps (min)	Teneur en air (%)		Surface spécifique α (mm ⁻¹)	Facteur d'espacement L (µm)
		Frais	Durci		
0 ppm	10	4,3	2,9	36	180
	20	4,3	2,8	36	185
	50	4,1	2,6	32	220
	80	4,1	2,3	35	210
30 000 ppm	10	4,4	1,8	44	190
	20	4,2	2,5	27	265
	50	4,0	3,4	21	305
	80	4,0	2,3	28	265
50 000 ppm	10	3,2	1,6	34	250
	20	3,2	1,6	29	305
	50	3,3	1,7	37	245
	80	3,5	1,7	37	245

De façon générale, la teneur en air est légèrement plus élevée dans du béton frais que dans le béton durci. Par contre, il est difficile d'expliquer la variation d'air de plus de 2% dans certains cas lors de cette recherche.

La formulation du mélange de référence, sans eau recyclée, provient du même mélange utilisé en usine. La difficulté à entrainer de l'air en laboratoire explique la faible teneur en air du béton durci du béton L-35-AE-00. Malgré ce faible pourcentage d'air, la surface spécifique est grande et le facteur d'espacement est petit.

5.2.1.3 Durabilité au gel

Le tableau 5.9 indique la variation de la masse de l'échantillon, le facteur de durabilité ainsi que la variation de l'allongement pour le mélange de 35 MPa. Ces résultats ont été obtenus après 300 cycles de gel-dégel selon la norme ASTM C666.

Tableau 5.9 – Résultats de gel-dégel du béton L-35-AE-XX

L-35-AE-XX	Δ masse %	F.D. %	ΔL/L μm/m
30 000 ppm	-0,69	98,5	184
50 000 ppm	-0,57	99,3	156

Les résultats obtenus indiquent que le béton échantillonné à 30 000 ppm et à 50 000 ppm ont une bonne résistance au gel lors des cycles de gel-dégel. Par contre, cette observation repose sur un seul échantillon de chacune des deux concentrations.

5.2.2 Effet séparé

Afin de dissocier l'effet des solides dans l'eau de gâchage de l'effet des ions en solution, des bétons ont été fabriqués avec l'une ou l'autre des deux parties.

5.2.2.1 Effet des ions en suspension dans l'eau de gâchage

Une première série de bétons de la rubrique *Effet séparé* a été fabriquée en remplaçant les solides en suspension par l'eau de l'aqueduc. Le mélange utilisé est le 30 MPa sans air entraîné. Les tableaux qui suivent illustrent les résultats obtenus pour les différents essais qui ont été faits sur ce mélange. Le tableau 5.10 présente les résultats obtenus en laboratoire pour le mélange de 30 MPa en utilisant la partie liquide seulement de l'eau recyclée.

Tableau 5.10 – Résultats obtenus en laboratoire avec les bétons L-30-AE-XX_L

L-30-SA-XX _L	Température (°C)				Affaissement (mm)				Air (%)				Temps prise (heure)	Résistance à la compression (MPa)			Date
	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min		24h	7 jours	28 jours	
0 ppm	22	22		21	190	180	160	135	2,4	2,2	2,1	2,4	5 h 22	16	30	36	2006-09-30
30 000 ppm	24	23	22	22	180	160	130	110	2,4	2,0	2,0	2,1	5 h 06	18	29	36	2006-09-30
50 000 ppm	23	23	22	22	170	160	140	110	2,2	2,2	2,5	2,5	5 h 10	17	30	37	2006-09-30
75 000ppm	24	24	24	24	140	110	100	70	2,8	3,0	3,1	3,4	4 h 47	18	30	38	2006-09-30
100 000 ppm	22	22	22	22	180	155	110	110	2,1	2,1	2,0	2,0	5 h 57	16	31	38	2006-10-06

5.2.2.2 Effet des solides en suspension dans l'eau de gâchage

La deuxième série de bétons de la section *Effet séparé* a été fabriquée avec les solides en suspension. La portion liquide de l'eau recyclée a donc été remplacée par de l'eau de l'aqueduc. Cette expérimentation a été faite avec le mélange de 25 MPa avec air entraîné. Le tableau 5.11 présente les résultats obtenus en laboratoire pour le mélange de 25 MPa avec air entraîné en utilisant la partie solide seulement de l'eau recyclée.

Tableau 5.11 – Résultats obtenus en laboratoire avec les bétons L-25-AE-XXs

L-25-AE-XXs	Température (°C)				Affaissement (mm)				Air (%)				Temps prise (heure)	Résistance à la compression (MPa)			Date
	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min	10 min	20 min	50 min	80 min		24h	7 jours	28 jours	
0 ppm	25	25	25	25	60	50	35	30	7,0	6,4	6,0	5,5	5 h 00	14		28	2006-08-04
30 000 ppm	23	23	23	23	50	35	35	35	8,1	7,0	5,1	4,2	5 h 17	14	29	36	2006-10-06
50 000 ppm	23	23	24	24	35	30	25	25	7,9	7,0	5,3	4,7	5 h 45	11	22	27	2006-10-07
75 000ppm	25	25	26	26	30	25	25	20	4,2	3,9	3,3	3,1	4 h 48	15	29	35	2006-10-07
100 000 ppm	27	27	27	27	10	10	5	0	4,2	3,8	3,4	3,2	4 h 12	15	29	38	2006-10-07

5.3 Phase III : Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en usine

Dans le cas des bétons d'usine, il faut rappeler que les quatre séries de bétons ont été produites selon des plages d'affaissement fixées. Les plages d'affaissement des séries C-35-AE, C-30-SA, C-25-AE et C-25-SA sont respectivement de 100 ± 20 mm, 80 ± 20 mm, 80 ± 10 mm et 80 ± 10 mm. Lors du malaxage, les dosages en eau ont été légèrement ajustés de manière à ce que les bétons possèdent une maniabilité conforme aux plages d'affaissement exigées par les utilisateurs. Cette contrainte a fait

en sorte qu'il ne sera pas possible d'analyser directement l'influence de l'eau recyclée sur l'affaissement des bétons produits en usine.

Les tableaux 5.12 à 5.15 indiquent les résultats obtenus lors des essais en usine sur les différents mélanges. Les tableaux indiquent des résultats à 0 ppm suivis des résultats avec différentes quantités de ppm puisque l'échantillonnage d'un béton fabriqué avec seulement de l'eau potable suivi immédiatement du même béton mais avec de l'eau recyclée à été fait pour fin de comparaison. De plus, prendre note que la provenance du ciment a changé au cours de la période d'échantillonnage.

Tableau 5.12 – Résultats obtenus en usine avec les bétons C-35-AE-XX

C-35-AE-XX	Température (°C)	Affaissement (mm)	Air (%)	Temps prise (heure)	Ressuage		Résistance à la compression (MPa)			Date	Échantillon	Ciment type 10
					Heure	ml	24h	7 jours	28 jours			
0 ppm	19	100	6,0	10 h 31	7 h 37	14,4	14,3	38,1	44,4	2004-10-28	JL 118	Mississauga
23 000 ppm	19	110	5,6	9 h 44	7 h 38	13,3	15,0	37,7	46,3	2004-10-28	JL 119	Mississauga
0 ppm	25	80	5,2	8 h 44	6 h 51	7,0	16,8	37,7	47,5	2004-10-21	JL 113	Joliette
36 000 ppm	21	80	4,7	7 h 52	5 h 39	4,8	15,0	39,8	51,1	2004-10-21	JL 114	Joliette
0 ppm	22	90	6,2	8 h 35	6 h 58	9,7	16,2	34,0	43,7	2004-09-29	JL 107	Mississauga
46 000 ppm	22	95	5,2	7 h 32	6 h 06	8,9	16,4	37,3	47,0	2004-09-29	JL 108	Mississauga
0 ppm	22	110	6,2	8 h 52	6 h 20	8,0	14,4	35,2	43,8	2004-11-11	JL 126	Mississauga
50 000 ppm	21	100	5,6	7 h 05	4 h 54	4,9	13,5	35,2	44,6	2004-11-11	JL 127	Mississauga

Tableau 5.13 – Résultats obtenus en usine avec les bétons C-30-SA-XX

C-30-SA-XX	Température (°C)	Affaissement (mm)	Air (%)	Temps prise (heure)	Ressuage		Résistance à la compression (MPa)			Date	Échantillon	Ciment type 10
					Heure	ml	24h	7 jours	28 jours			
0 ppm	25	80	2,9	6 h 00	4 h 16	14,5	17,6	35,7	43,0	2004-10-27	JL 116	Mississauga
21 000 ppm	25	80	2,9	5 h 54	4 h 10	12,0	17,4	34,4	42,4	2004-10-27	JL 117	Mississauga
0 ppm	19	80	2,7	6 h 48	5 h 42	18,4	17,1	34,5	41,8	2004-10-18	JL 111	Joliette
34 000 ppm	19	80	2,6	6 h 01	4 h 53	13,1	17,5	35,0	42,4	2004-10-18	JL 112	Joliette
0 ppm	23	100	2,6	7 h 02	5 h 13	17,1	17,8	35,3	44,2	2004-11-03	JL 121	Mississauga
34 200 ppm	20	100	2,6	6 h 34	5 h 07	17,0	18,9	34,7	45,0	2004-11-03	JL 122	Mississauga
0 ppm	19	70	2,4	7 h 11	4 h 51	16,9	18,4	37,4	45,5	2004-11-17	JL 133	Mississauga
45 000 ppm	22	80	2,7	4 h 50	4 h 03	13,9	21,0	37,2	46,5	2004-11-17	JL 134	Mississauga
0 ppm	22	90	2,3	6 h 10	5 h 21	16,2	19,4	39,5	47,0	2004-11-25	JL 137	Joliette
49 000 ppm	22	90	2,5	5 h 54	4 h 42	18,3	16,9	37,6	46,9	2004-11-25	JL 138	Joliette

Tableau 5.14 – Résultats obtenus en usine avec les bétons C-25-AE-XX

C-25-AE-XX	Température (°C)	Affaissement (mm)	Air (%)	Temps prise (heure)	Ressuage		Résistance à la compression (MPa)			Date	Échantillon	Ciment type 10
					Heure	ml	24h	7 jours	28 jours			
0 ppm	19	80	6,0	8 h 58	5 h 39	27,9	6,0	24,4	32,4	2004-11-30	JL 140	Joliette
36 000 ppm	20	70	5,1	6 h 53	4 h 14	13,5	7,1	25,8	32,8	2004-11-30	JL 141	Joliette
0 ppm	20	80	6,2	10 h 48	7 h 58	30,6	4,3	26,2	37,3	2004-10-13	JL 109	Joliette
43 000 ppm	20	80	6,0	8 h 15	5 h 12	23,6	6,5	25,6	35,6	2004-10-13	JL 110	Joliette
0 ppm	19	80	6,5	8 h 55	5 h 51	27,7	6,9	23,9	31,2	2004-11-30	JL 139	Joliette
47 000 ppm	20	70	5,3	6 h 40	4 h 00	17,6	6,7	26,5	34,1	2004-11-30	JL 142	Joliette

Tableau 5.15 – Résultats obtenus en usine avec les bétons de C-25-SA-XX

C-25-SA-XX	Température (°C)	Affaissement (mm)	Air (%)	Temps prise (heure)	Ressuage		Résistance à la compression (MPa)			Date	Échantillon	Ciment type 10
					Heure	ml	24h	7 jours	28 jours			
0 ppm	18	80	3,3	8 h 15	5 h 31	35,1	7,3	25,5	37,0	2004-11-16	JL 130	Mississauga
55 000 ppm	20	80	3,3	7 h 32	5 h 46	37,2	6,8	23,0	33,5	2004-11-16	JL 132	Mississauga
0 ppm	18	70	3,5	7 h 51	5 h 16	24,9	8,2	25,7	35,9	2004-11-16	JL 128	Mississauga
58 000 ppm	19	70	3,3	7 h 26	4 h 34	31,9	7,1	25,1	35,5	2004-11-16	JL 131	Mississauga
0 ppm	17	70	2,9	10 h 00	7 h 00	33,1	3,5	28,1	35,7	2004-12-06	JL 143	Joliette
67 000 ppm	19	70	2,9	7 h 46	5 h 27	21,3	3,4	27,7	35,1	2004-12-06	JL 144	Joliette

6 Discussion et analyse des résultats

Ce chapitre présente une analyse des résultats expérimentaux présentés au chapitre 5 pour chacune des trois phases de cette recherche.

6.1 Phase I : Caractérisation physico-chimique des eaux recyclées

Les résultats de la rubrique *Mesures en continu à l'intérieur du bassin d'agitation à l'usine* ont démontré que la densité et la température sont très variables dans le temps. Le tableau 5.2 du chapitre précédent indique que les autres paramètres, tels que le pH, les chlorures, les sulfates et les alcalis, le sont tout autant.

Les figures 6.1 à 6.4 ont pour but de déterminer s'il existe une corrélation entre le pH, les teneurs en chlorures, sulfates, alcalis et la teneur en solides totaux.

De façon générale, les concentrations de sulfates sont comprises entre moins de 0,5 mg/L et 88,3 mg/L à l'exception d'une valeur qui s'explique difficilement. La figure 6.1 démontre qu'il est impossible d'établir une corrélation entre la concentration des sulfates et celle des solides totaux.

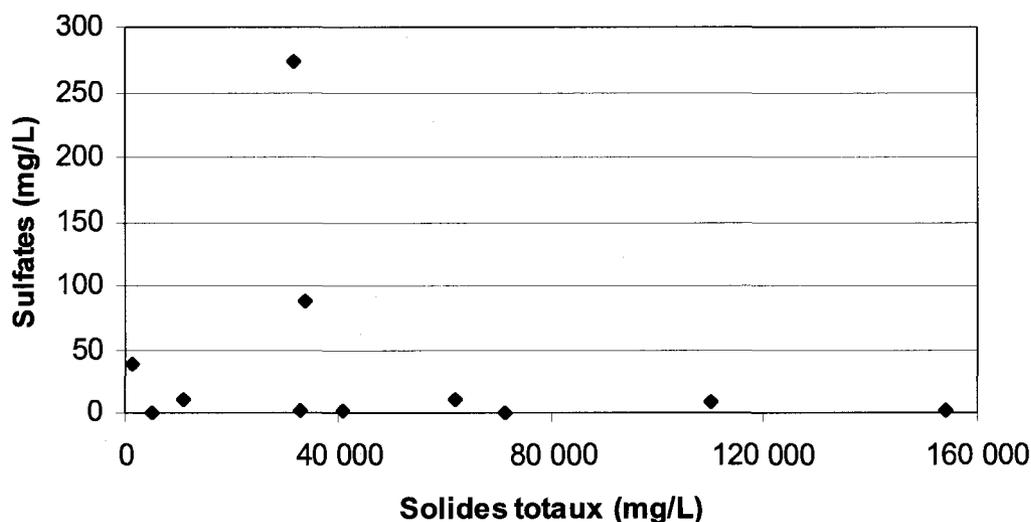


Figure 6.1 – Teneur en sulfates en fonction de la concentration en solides totaux

Les alcalis totaux équivalents (Na_2O) sont calculés à partir de la formule suivante : $(0,658 \times \text{Potassium}) + \text{Sodium}$. La concentration minimale en alcalis équivalents est de 101 mg/L et la concentration maximale est de 1211 mg/L. La figure 6.2 démontre que, de façon générale, la concentration en alcalis équivalents

Na₂O augmente en fonction des solides totaux. Cette progression est normale car les alcalis sont principalement apportés par le ciment. Une teneur en solides totaux élevée indique une plus forte concentration des hydrates du ciment et, par conséquence, une plus forte concentration en alcalis totaux.

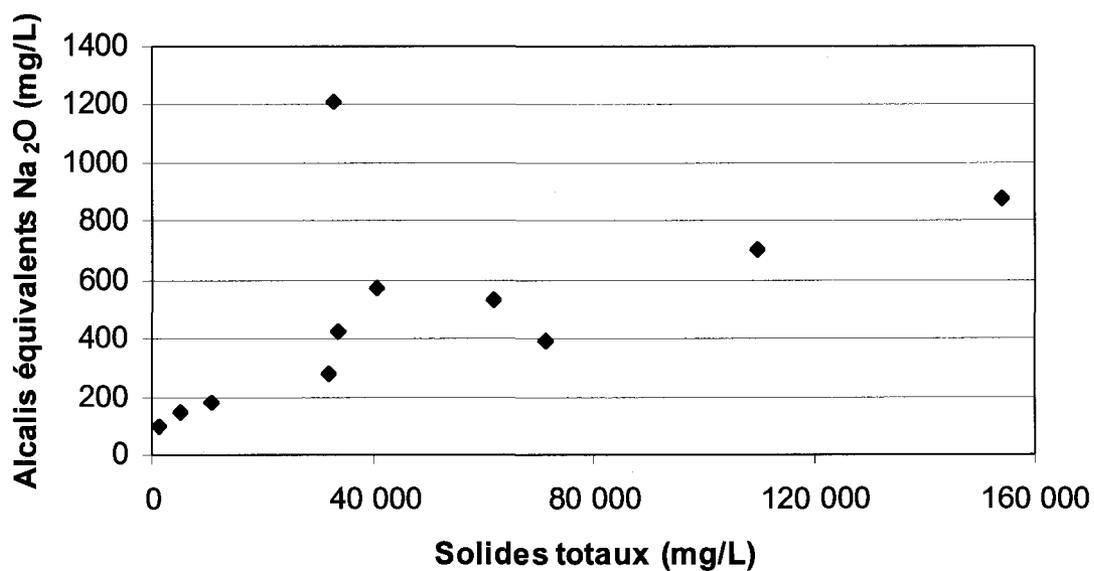


Figure 6.2 – Teneur en alcalis équivalent Na₂O en fonction de la concentration en solides totaux

La concentration minimale des analyses des chlorures est de moins de 4 mg/L et la concentration maximale est de 271 mg/L. La figure 6.3 indique qu'il n'y a pas de relation entre la concentration de solides totaux et les chlorures. L'absence de chlorure découle probablement d'une directive technique du producteur, qui ne permet pas le recyclage des bétons contenant des accélérateurs à base de chlore. Les deux analyses contenant des teneurs plus élevées en chlorures (134 mg/L et 271 mg/L) possèdent aussi des teneurs en sulfates les plus élevées (88 mg/L et 273 mg/L, figure 6.1) Ces résultats suggèrent que le bassin d'agitation ait pu accidentellement être contaminé par une source externe riche en chlorures et en sulfates.

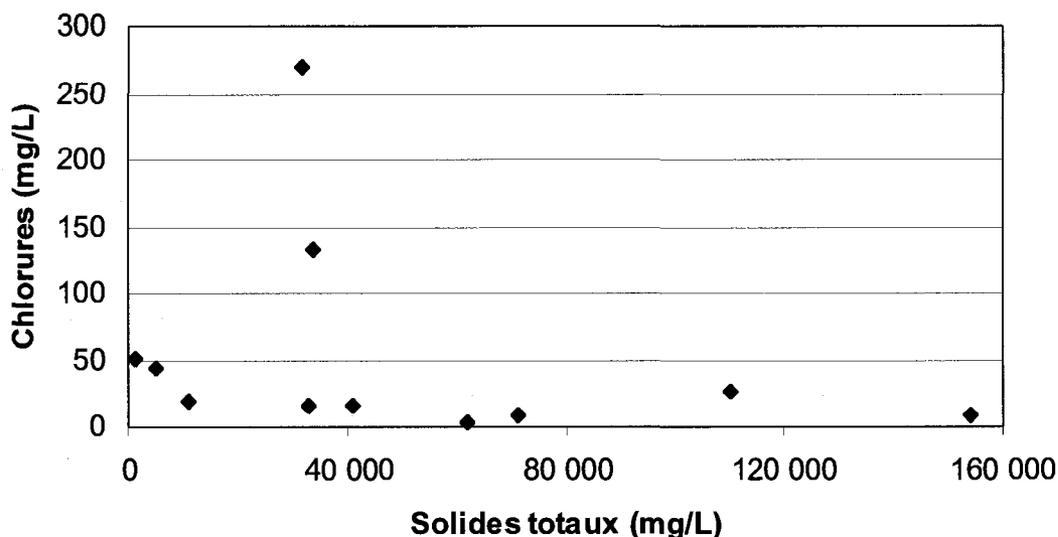


Figure 6.3 – Teneur en chlorures en fonction de la concentration en solides totaux

Le pH des analyses ponctuelles est compris entre 11,7 et 12,7. Les données de la figure 6.4 montrent deux mesures de pH relativement faible par rapport aux autres. Ces deux mesures correspondent aux mêmes analyses montrant une plus forte teneur en chlorures et en sulfates. Il est possible que ces deux valeurs relativement faibles du pH soient dues à un fort ajout d'eau dans le recycleur dans le but de diminuer la teneur en solides. Cet ajout d'eau a pu diminuer le pH (effet de dilution) et il a pu aussi apporter des chlorures (chlore résiduel pour la désinfection de l'eau potable) et des sulfates. À l'exception des deux mesures plus faibles, le pH augmente légèrement en fonction de la teneur en solides totaux. Cette augmentation du pH est compatible avec l'augmentation de la teneur en alcalis en fonction de la teneur en solides totaux.

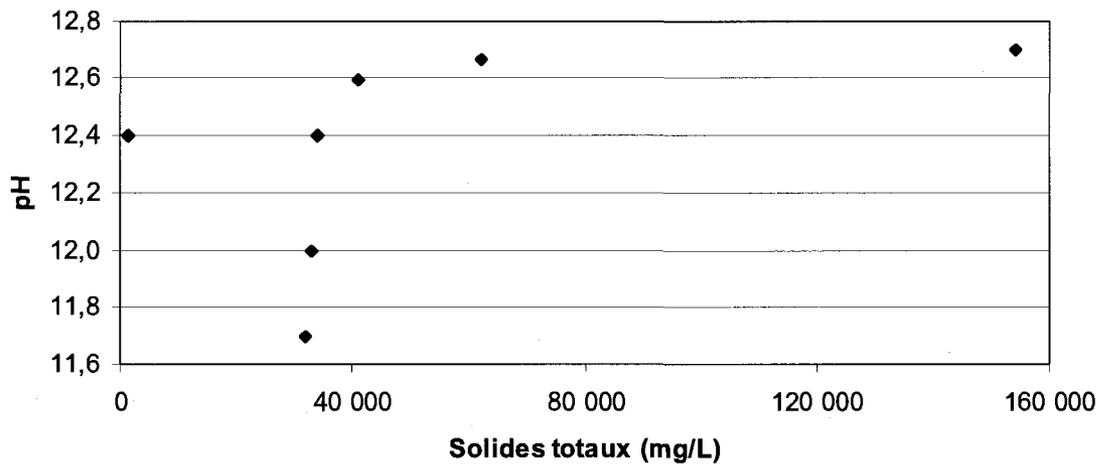


Figure 6.4 – pH en fonction de la concentration en solides totaux

Les variations des teneurs en solides totaux dépendent du taux d'utilisation du recycleur à béton frais. Puisque la concentration des différentes composantes de l'eau recyclée, à l'exception des alcalis et du pH, ne varie pas en fonction des solides totaux, il est difficile, voir impossible, de prévoir les variations journalières, mensuelles ou annuelles des différentes composantes chimiques de l'eau recyclée.

6.2 Phase II : Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en laboratoire

6.2.1 Effet combiné

Les figures qui suivent ont été produites à partir des résultats des tableaux 5.4 à 5.7 du chapitre 5 afin d'établir s'il existe une corrélation entre les différents paramètres de caractérisation du béton et la teneur en solides totaux dans l'eau de gâchage.

6.2.1.1 Affaissement

La figure 6.5 montre qu'une plus grande proportion d'eau recyclée (augmentation de la teneur en solides) diminue significativement l'affaissement des bétons. Les pertes maximales obtenues à 100 000 ppm par rapport au béton de référence sont de 40 mm (L-25-AE-100), 50 mm (L-30-SA-100), 80 mm (L-25-SA-100) jusqu'à une perte totale d'affaissement dans le cas du 35 MPa pour des concentrations supérieures à 75 000 ppm. Le rapport E/L réel est indiqué, pour les mélanges à 0 ppm et à 100 000 ppm, afin d'observer l'effet de l'ajout de solide sur le rapport E/L réel.

Puisque la quantité d'eau totale (potable + recyclée) ne varie pas, l'ajout d'eau recyclée (ajout de particules fines) diminue la quantité totale de liquide dans le béton.

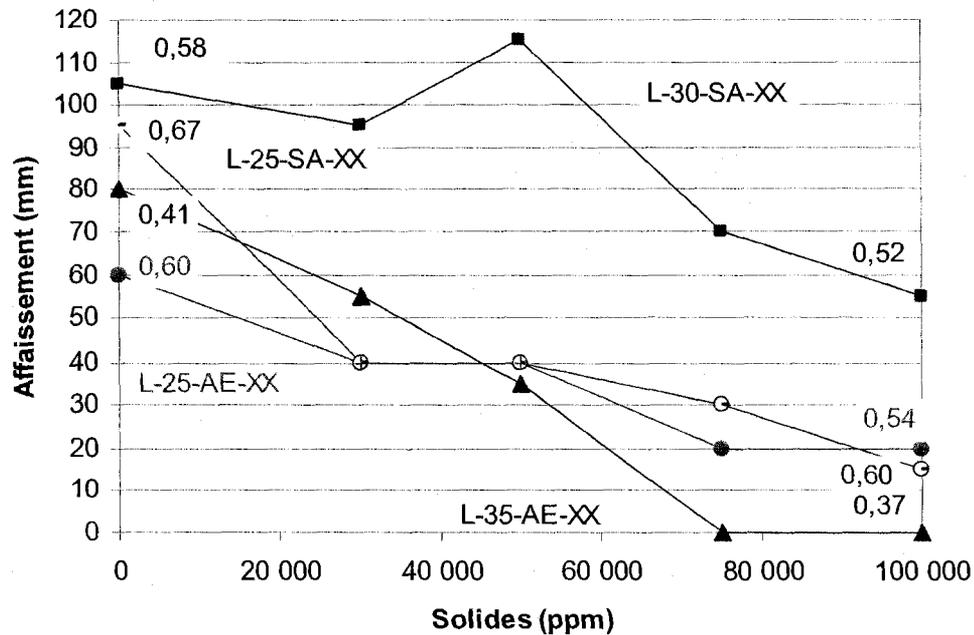


Figure 6.5 – Affaissement des bétons fabriqués en laboratoire en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage et du rapport E/L réel

6.2.1.2 Temps de prise

L'augmentation de la concentration de solides dans l'eau de gâchage engendre systématiquement une diminution du temps de prise (figure 6.6). Dans le cas de ces quatre mélanges, cette variation est de $2 : 15 \pm 15$ minutes. Le temps de prise des bétons L-35-AE-75 et L-35-AE-100 n'a pas pu être mesuré en raison de l'impossibilité de fabriquer les éprouvettes requises pour cet essai (aucune maniabilité). Le rapport E/L réel est indiqué à 0 ppm et à 100 000 ppm pour chacun des mélanges.

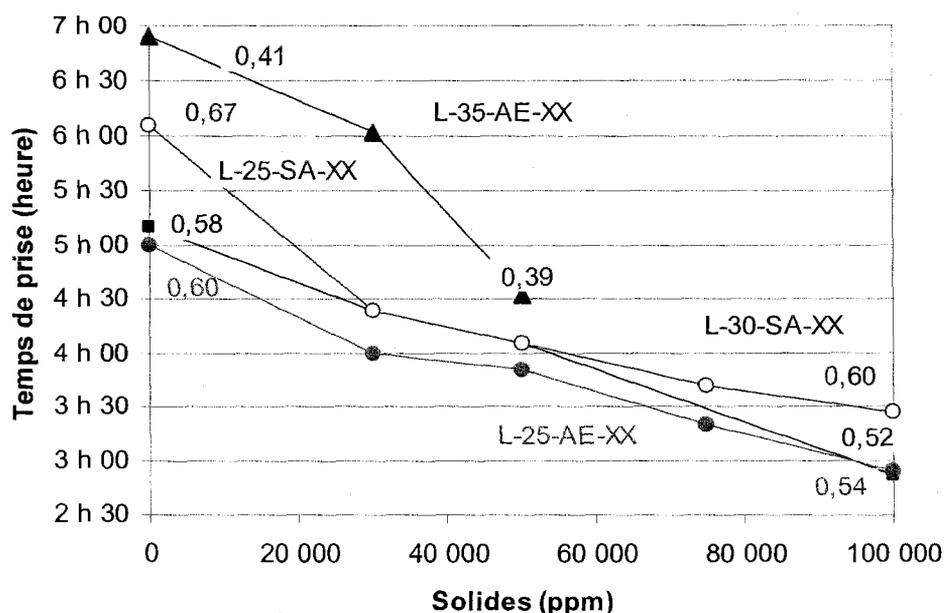


Figure 6.6 – Temps de prise des bétons fabriqués en laboratoire en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage et du rapport E/L réel.

6.2.1.3 Teneur en air du béton frais

La figure 6.7 présente les relations entre le volume d'air et la teneur en solides dans l'eau de gâchage. Les nombres indiqués au voisinage des points expérimentaux correspondent à l'affaissement du béton (mm).

Cette figure montre que l'augmentation de la quantité d'eau recyclée a très peu d'effet sur la quantité d'air normalement piégé lors du malaxage (L-30-SA-XX et L-25-SA-XX). La variation d'air piégé est plutôt fonction de la maniabilité du mélange. C'est-à-dire que plus le mélange est fluide, plus il est facile de piéger l'air. L'affaissement obtenu à 10 minutes est indiqué au dessus ou en dessous de chaque point afin de mettre en évidence la corrélation entre la quantité d'air piégé et la maniabilité.

Dans le cas du béton avec air entraîné (L-35-AE-XX et L-25-AE-XX), les courbes de la figure 6.7 suggèrent que l'augmentation de la teneur en solides engendre une légère diminution du volume d'air entraîné. Il n'est pas possible d'évaluer les effets de l'eau recyclée sur l'entraînement d'air du L-35-AE-XX à des concentrations supérieures à 50 000 ppm en raison de sa faible maniabilité.

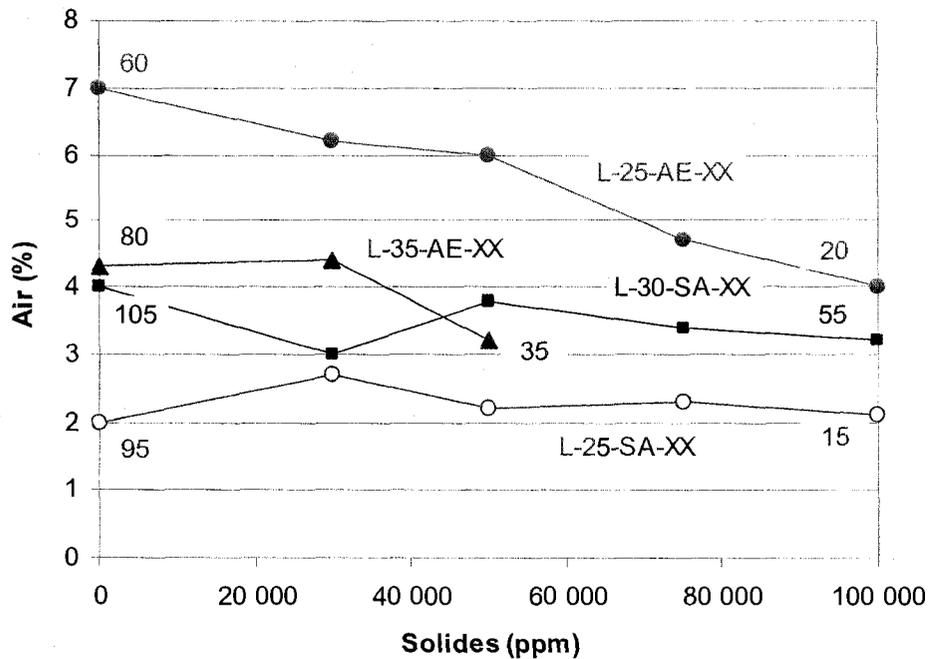


Figure 6.7 – Teneur en air des bétons frais fabriqués en laboratoire en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage et de l'affaissement (mm)

6.2.1.4 Résistance à la compression

La figure 6.8 présente l'évolution de la résistance à la compression à 24 heures en fonction de la teneur en solides. Les nombres indiqués près des courbes indiquent le rapport E/L réel. Les courbes indiquent clairement que cette résistance n'est pas affectée par la teneur en solides. Pour le béton de 35 MPa, la variation de la résistance est moins de 2% par rapport au béton de référence sans eau recyclée. Pour le béton de 30 MPa, l'eau recyclée a engendré une augmentation de la résistance d'environ 7% (30 000 et 100 000 ppm) et une baisse maximale de 18% dans le cas du béton avec 50 000 ppm. Pour les bétons de 25 MPa, l'utilisation d'eau recyclée a engendrée une légère augmentation de la résistance à 24 heures. Cette augmentation est comprise entre 0 et 21% par rapport à la résistance du béton de référence sans eau recyclée.

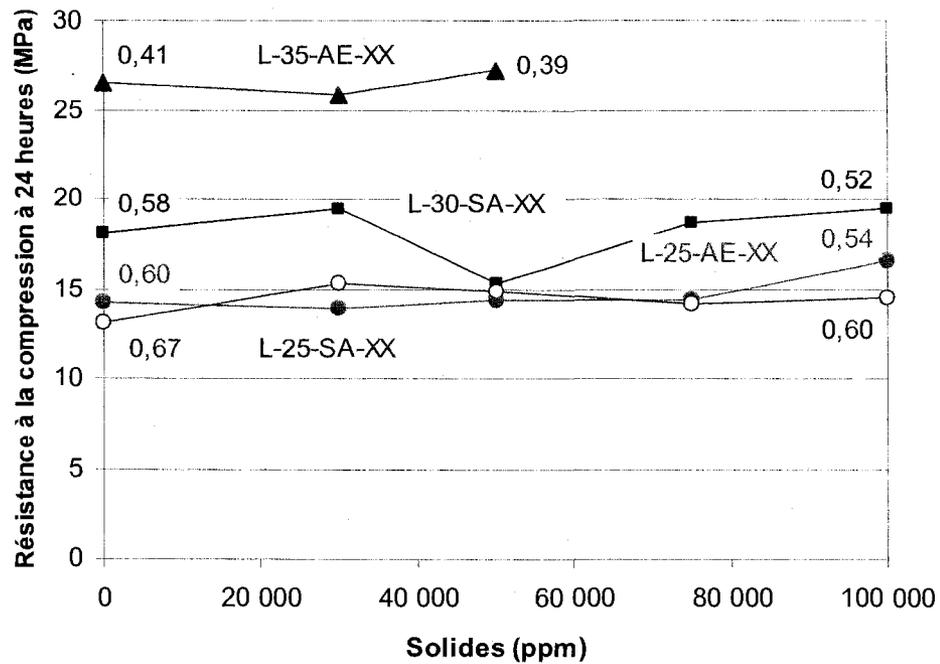


Figure 6.8 – Résistance à la compression à 24 heures en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage et du rapport E/L réel.

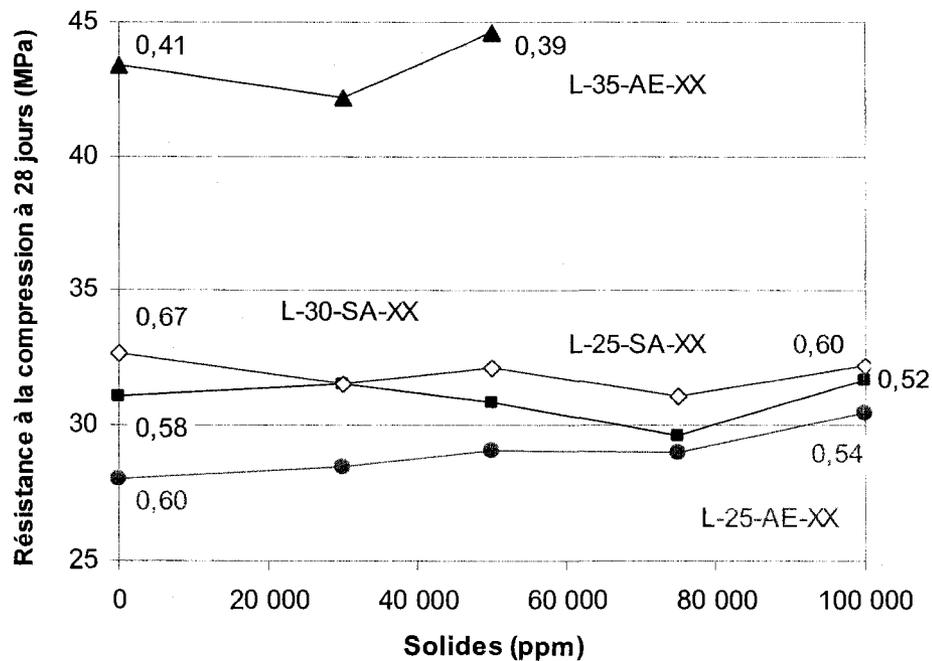


Figure 6.9 – Résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage et du rapport E/L réel.

La figure 6.9 présente les résistances à la compression à 28 jours des quatre mélanges pour des concentrations variant de 0 ppm à 100 000 ppm. Les nombres en début et fin de courbe indiquent le rapport E/L réel.

De façon générale, l'utilisation d'eau recyclée n'a que très peu modifié les résistances à la compression à 28 jours des bétons fabriqués en laboratoire. La variation de la résistance à 28 jours des mélanges de 35 MPa, 30 MPa, 25 MPa avec air entrainé et sans air entrainé sont respectivement de 3%, 4%, 7% et 6%.

Pour pouvoir mieux comprendre l'influence de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais et durci, les concepts de rapport eau/liant apparent (E/L_{app}) et de rapport eau/liant réel ($E/L_{réel}$) s'avèrent très importants. Le calcul du E/L_{app} prend en compte la masse d'eau potable et la masse d'eau recyclée en y incluant la masse des solides en suspension. Le calcul du $E/L_{réel}$ n'inclut pas la masse des solides en suspension dans l'eau recyclée. Lors des opérations normales de production d'une formulation de béton avec eau recyclée, une partie de l'eau de gâchage est remplacée par la même masse d'eau recyclée (incluant les solides en suspension). Par conséquent, le E/L_{app} est constant mais le $E/L_{réel}$ peut varier en fonction de la teneur en solides de l'eau recyclée ou de la proportion d'eau recyclée dans l'eau de gâchage.

6.2.1.5 Réseau des bulles d'air du béton durci

Les figures 6.10 à 6.12 présentent l'évolution, en fonction du temps, des caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton durci (% air, α , \bar{L}) pour les béton de 35 MPa.

La figure 6.10 présente l'évolution de la teneur en air du béton durci en fonction du temps du mélange de 35 MPa. Dans le cas du béton de référence sans eau recyclée (L-35-AE-00), la teneur en air initiale à 10 minutes du béton durci est relativement faible (3%). Cette faible teneur en air découle du fait qu'il est relativement difficile d'entraîner de l'air avec le malaxeur du laboratoire. Cette courbe montre qu'entre 10 et 80 minutes, la teneur en air du béton durci passe de 2,9% à 2,3% (tableau 5.8). La teneur en air de ce béton à l'état frais est de 4,3%, ce qui est inférieur à la plage visée de 5% à 8%.

Dans le cas du béton fabriqué avec de l'eau de gâchage à 30 000 ppm, la teneur en air initiale à 10 minutes chute à 1,8%. Ce résultat montre que l'utilisation d'eau recyclée engendre une perte d'air initiale. Par la suite, le volume d'air semble instable car il augmente à 3,4% à 50 minutes pour ensuite diminuer à 2,3% à 80 minutes.

L'utilisation d'eau de gâchage à 50 000 ppm dans l'eau de gâchage semble empêcher complètement l'entraînement d'air (figure 6.10). En effet, à 10 minutes, l'air dans le béton durci n'est plus que de 1,6% et se maintient à moins de 1,8% jusqu'à la fin de l'essai. Globalement, ces résultats indiquent que l'utilisation d'eau recyclée nuit à l'entraînement d'air et peut engendrer une instabilité du volume d'air entraîné.

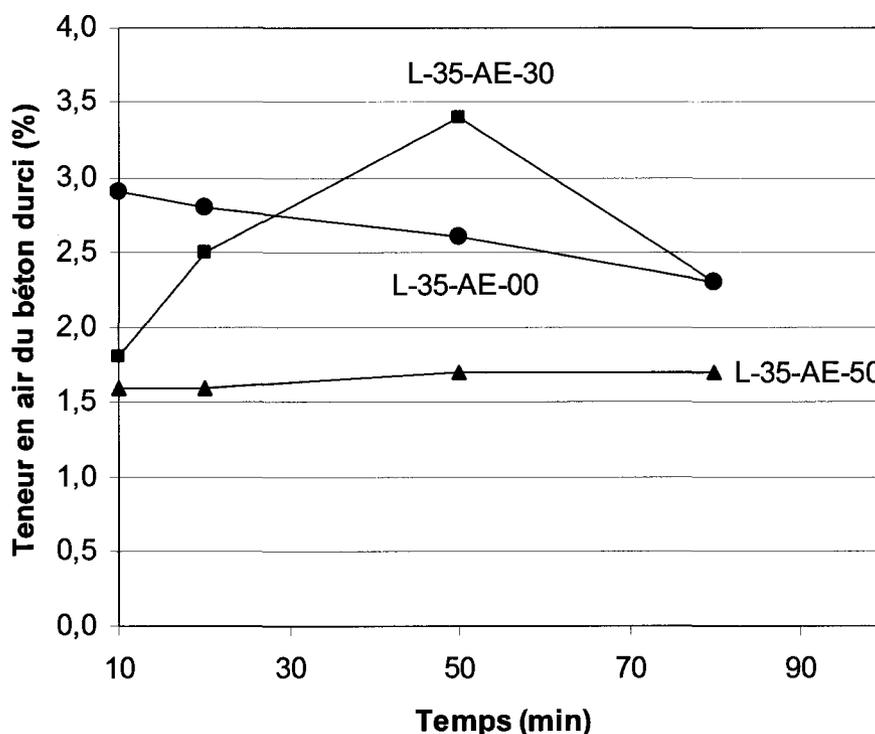


Figure 6.10 – Évolution de la teneur en air du béton durci du béton L-35-AE-XX en fonction du temps

La figure 6.11 présente l'évolution de la surface spécifique des bulles d'air en fonction du temps. Dans le cas du béton de référence, (L-35-AE-00) la surface spécifique est comprise entre 31 et 36 mm^{-1} , ce qui indique que le réseau de bulle d'air est constitué de bulles d'air de petites dimensions. En général, les bulles d'air entraîné ont une dimension acceptable lorsque la surface spécifique est supérieure à 25 mm^{-1} . Ces données indiquent que malgré une teneur en air relativement faible (< 3%), les bulles

d'air entraîné sont néanmoins efficaces car leur dimension moyenne est relativement faible. De plus, au cours du temps, la surface spécifique du béton de référence est relativement stable.

Les courbes de la figure 6.11 montrent que la surface spécifique du béton avec 30 000 ppm est très instable. Elle passe de 44 mm^{-1} à 10 minutes à 21 mm^{-1} à 50 minutes pour ensuite remonter à 28 mm^{-1} à 80 minutes. Cette instabilité a aussi été constatée dans le cas du volume d'air entraîné (figure 6.10) de ce béton.

L'eau de gâchage contenant 50 000 ppm a aussi engendré une instabilité de la surface spécifique. En effet, entre 10 et 20 minutes, la valeur passe de 34 mm^{-1} à 29 mm^{-1} . Par la suite, la surface spécifique remonte pour atteindre 37 mm^{-1} à 80 minutes. Globalement, ces résultats confirment que l'eau recyclée peut engendrer une instabilité du réseau de bulle d'air.

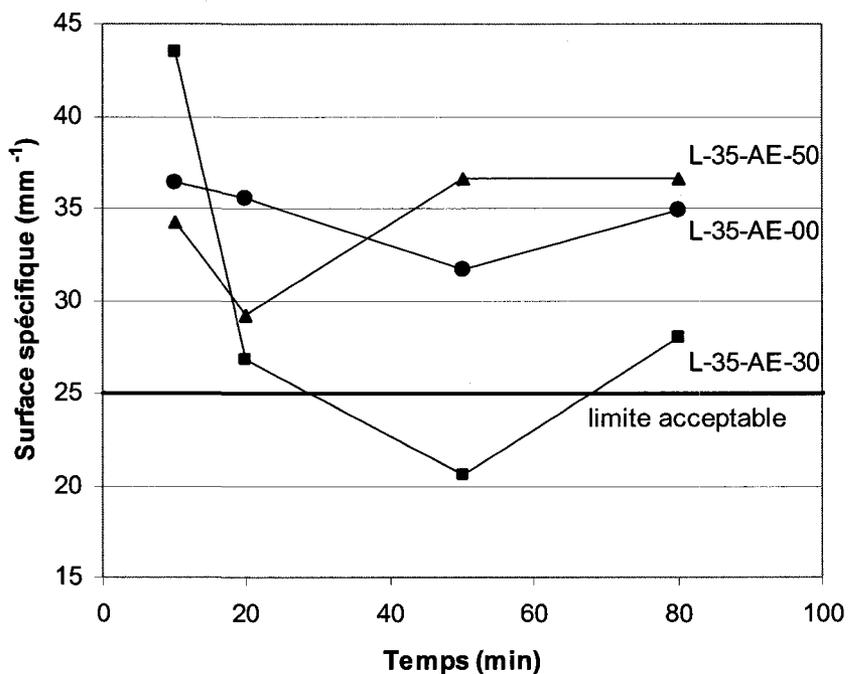


Figure 6.11 – Évolution de la surface spécifique du réseau de bulles d'air du béton L-35-AE-XX en fonction du temps

La figure 6.12 présente l'évolution du facteur d'espacement des bulles d'air en fonction du temps. Dans le cas du béton de référence, le facteur d'espacement est toujours inférieur à la limite maximale de $230 \mu\text{m}$. Ces résultats indiquent que malgré la teneur en air faible ($< 3\%$), le facteur d'espacement est néanmoins acceptable.

Cela s'explique par la surface spécifique relativement élevée ($> 31 \text{ mm}^{-1}$) qui indique que l'air est contenu dans des bulles d'air très petites, donc relativement proches les unes des autres. Le facteur d'espacement du béton de référence est légèrement instable puisqu'il passe de $180 \mu\text{m}$ à environ $210 \mu\text{m}$ entre 10 et 80 minutes. Cette instabilité est probablement due au faible volume d'air initial.

Le facteur d'espacement du béton avec une eau de gâchage à 30 000 ppm est très instable. Il passe de $190 \mu\text{m}$ à 10 minutes pour atteindre $310 \mu\text{m}$ à 50 minutes et $270 \mu\text{m}$ à 80 minutes. Cette augmentation du facteur d'espacement est essentiellement due à la forte baisse de la surface spécifique durant la même période (10-50 minutes).

Les résultats obtenus à 50 000 ppm montrent aussi une forte instabilité du facteur d'espacement. Le facteur d'espacement final n'est que légèrement supérieur à la limite de $230 \mu\text{m}$ et ce, malgré une teneur en air très faible ($< 2\%$). Ce résultat s'explique par la surface spécifique relativement élevée ($30\text{-}35 \text{ mm}^{-1}$) qui contribue à rapprocher les bulles malgré un volume total très faible.

Globalement, ces résultats indiquent que l'eau recyclée peut déstabiliser le réseau de bulles d'air. Cependant, cette déstabilisation n'est peut-être pas uniquement due à l'eau recyclée. Elle pourrait résulter de l'utilisation d'un relativement faible dosage de l'agent entraîneur d'air dans le béton de référence.

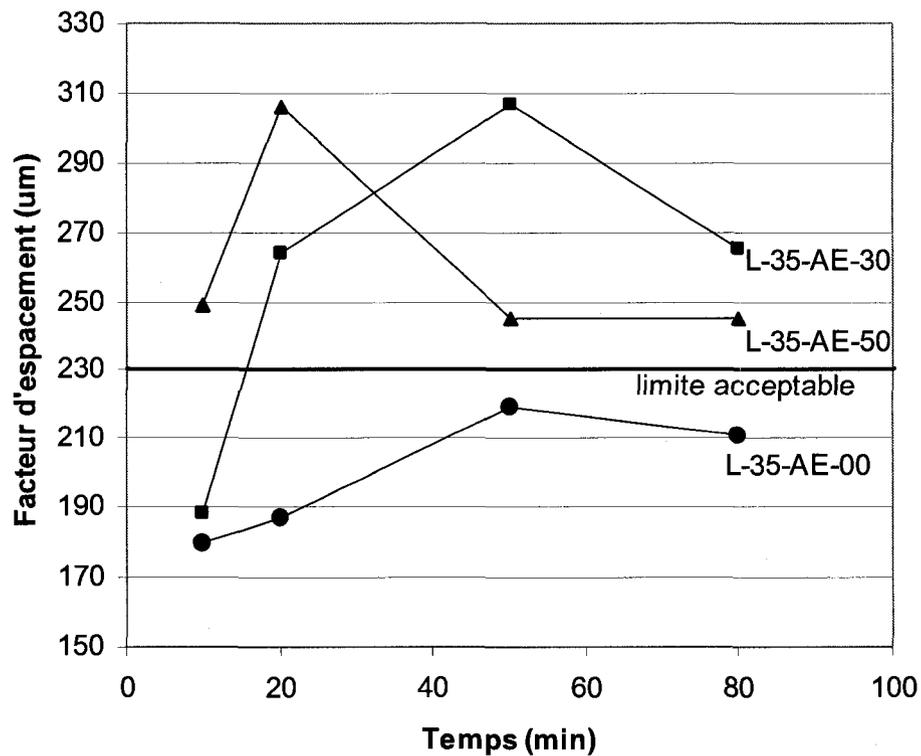


Figure 6.12 – Évolution du facteur d'espacement du béton L-35-AE-XX en fonction du temps

6.2.1.6 Durabilité à l'écaillage

Les résultats des essais d'écaillage des bétons L-35-AE-30 et L-35-AE-50 indiquent que ces deux bétons possèdent une mauvaise résistance à l'écaillage. Après 56 cycles de gel, la masse des débris du béton L-35-AE-30 est de 603 g/m^2 et celle du béton L-35-AE-50 est de 1140 g/m^2 . Ces valeurs, largement supérieures à la limite maximale de 500 g/m^2 prescrite par la norme NQ 2621-900, sont probablement dues au faible volume d'air entraîné des mélanges avec eau recyclée (3,2% et 4,2%). La figure 6.13 illustre les résultats de la masse de débris obtenue en fonction du nombre de cycles pour les deux bétons.

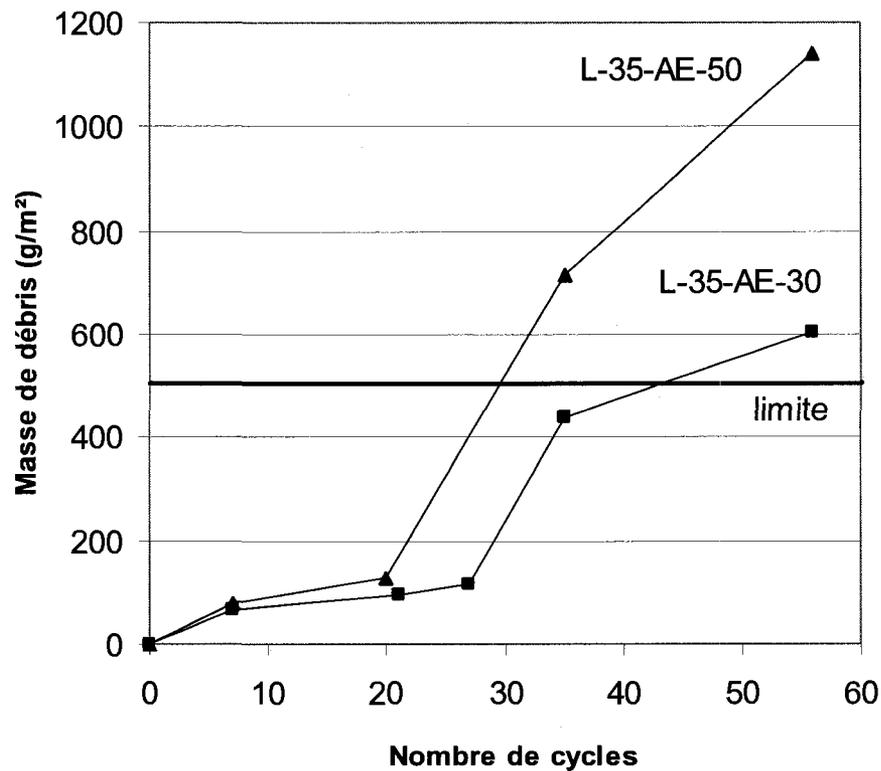


Figure 6.13 – La masse de débris des bétons L-35-AE-XX en fonction du nombre de cycles de gel-dégel

6.2.1.7 Durabilité au gel

Les essais de durabilité au gel ont été fait selon la procédure de la norme ASTM C666 procédure A. L'ensemble des résultats de durabilité au gel est présenté au tableau 5.9. Les résultats démontrent que les mélanges de 35 MPa à 30 000 ppm et à 50 000 ppm ont une bonne durabilité au gel-dégel. Ces résultats sont logiques puisque le facteur d'espacement critique d'un béton de 35 MPa est d'environ 400 μm . Les facteurs d'espacement des bétons testés (L-35-AE-30 et L-35-AE-50) sont inférieurs à cette valeur critique. Leur comportement au gel-dégel (fissuration interne) était donc prévisible.

6.2.1.8 Synthèse

De façon globale, les quatre séries de bétons en laboratoire ont été produites en utilisant un E/L_{app} constant pour chaque série. Cette approche est conforme aux méthodes commerciales de production des bétons avec eau recyclée. Cependant, les formulations des bétons montrent que plus la teneur en solides augmente dans

l'eau de gâchage (la proportion d'eau recyclée augmente), plus le rapport $E/L_{\text{réel}}$ diminue. De la même manière, la quantité de particules fines apportées par l'eau recyclée augmente et peut atteindre 20 kg/m^3 dans le cas d'une eau de gâchage contenant approximativement 100 000 ppm. La plupart des effets de l'utilisation d'eau recyclée, sur les propriétés des bétons de laboratoire, découlent probablement de la baisse du $E/L_{\text{réel}}$ et de l'apport de particules fines, engendrés suite au remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée. Ainsi, les diminutions de l'affaissement, du temps de prise et du volume d'air entraîné en fonction de la teneur en solides ont probablement été engendrées par le plus faible dosage en eau ($E/L_{\text{réel}}$) et l'apport de particules fines en suspension. L'utilisation d'une grande quantité d'eau recyclée n'a pas provoqué une chute de la résistance à la compression, probablement en raison de la baisse du $E/L_{\text{réel}}$ qui compense les effets de l'eau de gâchage de moins bonne qualité sur la quantité et la qualité des produits d'hydratation.

6.2.2 Effet séparé

6.2.2.1 Effets des ions en suspension dans l'eau de gâchage

6.2.2.1.1 Affaissement

La figure 6.14 illustre les résultats d'affaissement obtenus avec le mélange L-30-SA-XX et L-30-SA-XX_L. Il est important de noter que les bétons de la série L-30-SA-XX sont faits avec un sable et un ciment différents des bétons de la série L-30-SA-XX_L. C'est pour cette raison que, en l'absence d'eau recyclée, les résultats de l'affaissement ne sont pas les mêmes.

Les courbes de la figure 6.14 présentent la perte d'affaissement des bétons L-30-SA-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage. Cette courbe a déjà été présentée à la figure 6.5. Elle est reproduite ici à titre comparatif. La figure 6.14 présente aussi la courbe obtenue avec les bétons L-30-SA-XX_L fabriqués uniquement avec la partie liquide de l'eau recyclée. Par exemple, le résultat correspondant à 75 000 ppm a été obtenu avec une eau de gâchage ne contenant

pas de solides en suspension. Seule la partie liquide de cette eau, contenant initialement 75 000 ppm de solides a été extraite et utilisée pour le gâchage.

Les résultats de la figure 6.14 montrent que l'utilisation de la partie liquide de l'eau recyclée a provoqué une légère perte d'affaissement pour les eaux contenant jusqu'à 75 000 ppm. Pour cette dernière, la perte est d'environ 50 mm par rapport au béton de référence sans eau recyclée.

Dans le cas de l'eau contenant 100 000 ppm, l'affaissement augmente pour atteindre approximativement celui du béton de référence. Ces variations d'affaissement peuvent découler principalement de la variabilité de ce type de mesure.

Globalement, les affaissements identiques du béton de référence et du béton fabriqué avec la partie liquide de l'eau recyclée à 100 000 ppm suggèrent que les ions en solution dans l'eau recyclée (chlorures, alcalis, sulfates, etc.) ne semblent pas avoir une grande influence sur l'affaissement du béton. À titre comparatif, l'eau de gâchage comprenant les ions en solution et les particules en suspension (courbe L-30-SA-XX) présente une perte d'affaissement plus systématique à mesure que la teneur en solides augmente.

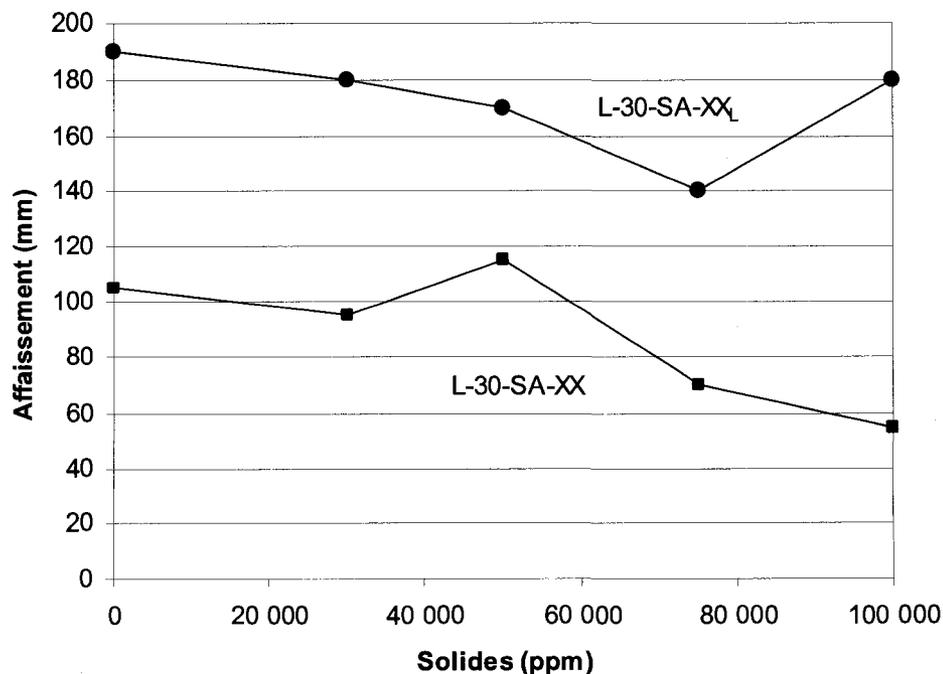


Figure 6.14 – Affaissement des bétons L-30-SA-XX_L et des bétons L-30-SA-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.1.2 Temps de prise

Les courbes de la figure 6.15 permettent de mieux comprendre l'origine de la diminution du temps de prise découlant de l'utilisation de l'eau recyclée. À titre comparatif, les résultats de la série L-30-SA-XX, déjà présentés à la figure 6.6, sont reproduits. Cette courbe montre que plus la teneur en solide augmente, plus le temps de prise diminue. A partir de cette seule courbe, il n'est pas possible de déterminer si la diminution du temps de prise découle de la présence des solides en suspension ou de la présence d'ion en solution.

Pour pouvoir déterminer quelle caractéristique de l'eau recyclée a la plus grande influence sur le temps de prise, des essais en n'utilisant que la fraction liquide d'eau recyclées contenant des quantités variables de solides en suspension (30 000 ppm - 100 000 ppm) ont été effectués. Ces résultats correspondent à la courbe identifiée par L-30-SA-XX_L. L'évolution de cette courbe montre que les ions en solution (alcalis, chlorures, sulfates, etc.) n'ont pas d'effet sur le temps de prise. Ce sont donc principalement les solides en suspension qui produisent la diminution du temps de prise. Leur effet découle probablement de la diminution du rapport E/L réel.

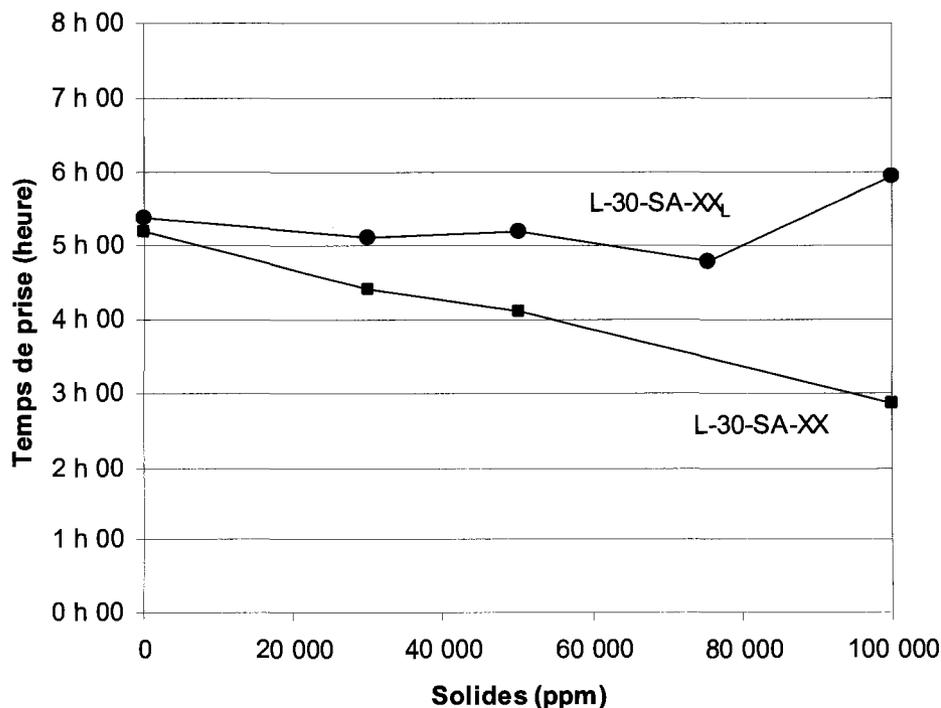


Figure 6.15 – Temps de prise des bétons L-30-SA-XX_L et L-30-SA-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.1.3 Résistance à la compression

La figure 6.16 présente les résistances à la compression obtenues pour les bétons L-30-SA-XX_L, fabriqués avec la fraction liquide de l'eau recyclée, et les mélanges L-30-SA-XX (liquide et solide de l'eau recyclée). À 28 jours, les résistances à la compression des bétons fabriqués avec la fraction liquide de l'eau recyclée sont supérieures ou équivalentes au béton de référence (0 ppm). Cependant, la différence n'est pas suffisamment marquée pour conclure que la partie liquide de l'eau recyclée a une influence sur la résistance à la compression des bétons. De plus, il serait surprenant d'observer un effet de l'utilisation de la partie liquide seulement sur la résistance à la compression puisque les résultats de la section *Effet combiné* (figure 6.8 et 6.9) ont montré que l'eau recyclée (liquide + solide) n'a pas d'effet direct sur la résistance à la compression.

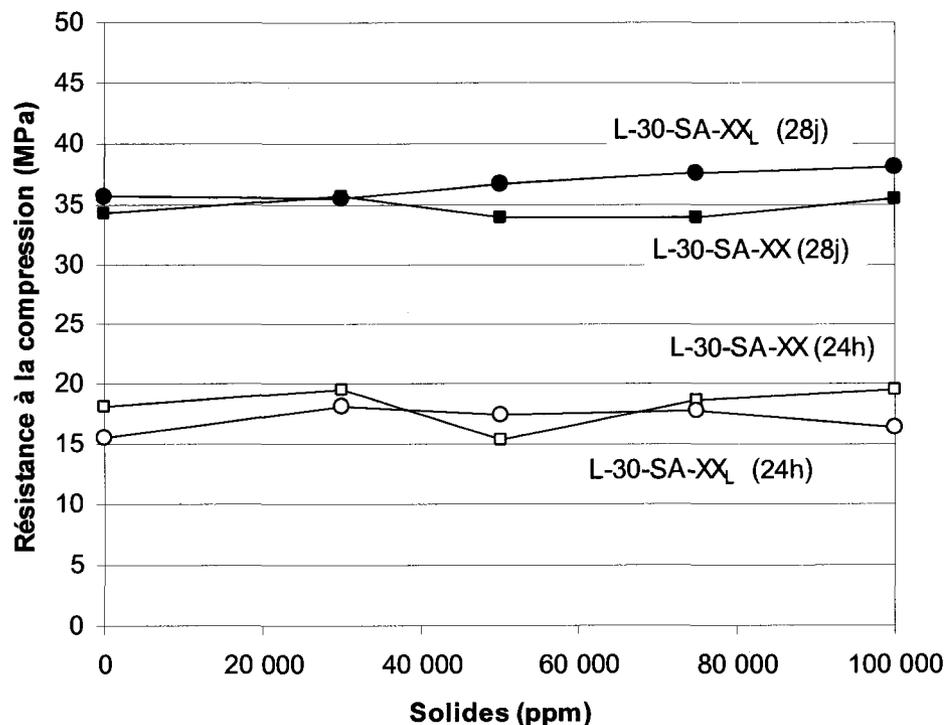


Figure 6.16 – Résistance à la compression des bétons L-30-SA-XX_L et des bétons L-30-SA-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.2 Effets des solides en suspension dans l'eau de gâchage

6.2.2.2.1 Affaissement

La figure 6.17 permet de mieux comprendre le rôle des solides en suspension sur l'affaissement des bétons contenant de l'eau recyclée. À titre comparatif, la figure 6.17 reproduit une des courbes de la figure 6.5 qui présente l'évolution de l'affaissement des bétons de la série L-25-AE-XX en fonction de la teneur en solides de l'eau recyclée. La figure 6.17 présente aussi les résultats obtenus en n'utilisant que les solides en suspension dans l'eau recyclée (la fraction liquide, contenant les ions en solution a été remplacée par l'eau potable).

Les deux relations sont similaires. Cela démontre donc que la perte d'affaissement est essentiellement due à la présence des particules fines dans l'eau recyclée. Les ions en solutions n'ont donc que très peu d'effet sur la perte d'affaissement, comme le suggèrent les résultats de la section *Effet des ions en suspension dans l'eau de gâchage* (6.2.2.1.1).

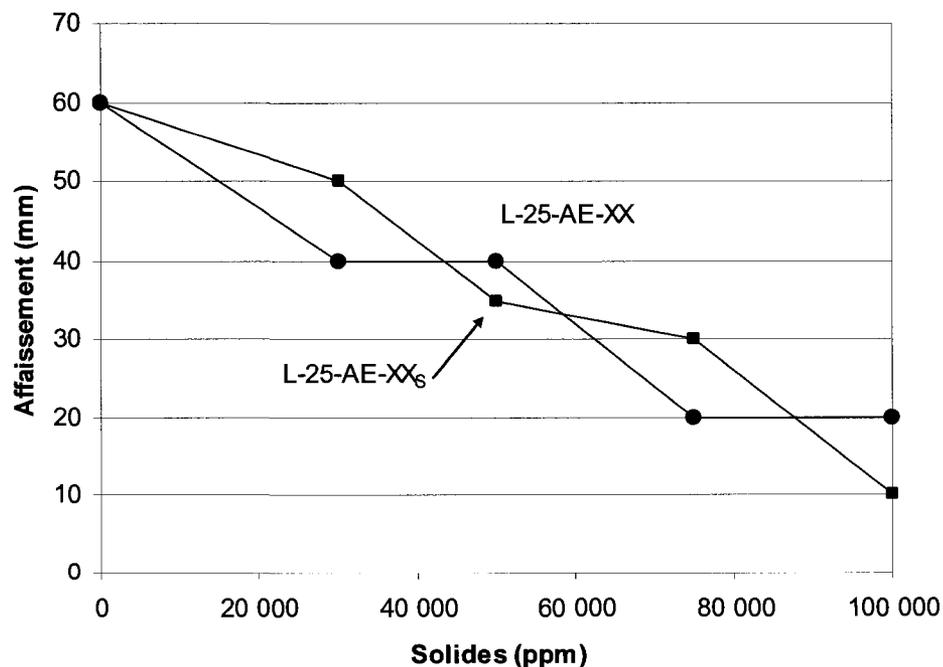


Figure 6.17 – Affaissement des bétons L-25-AE-XX_s et L-25-AE-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.2.2 Temps de prise

La figure 6.18 permet d'évaluer l'influence séparée des particules en suspension sur le temps de prise du béton. Cette figure reproduit la relation obtenue avec l'eau recyclée complète (ions en solution et particules en suspension) déjà présentée à la figure 6.6. Elle présente aussi la relation obtenue uniquement avec la fraction solide contenue dans l'eau recyclée. Cette courbe montre que la relation entre le temps de prise et la teneur en solides n'est pas très nette. Le temps de prise tend à diminuer en fonction de la teneur en solides. Il semble donc que plus les particules fines augmentent, plus le rapport E/L réel diminue et plus le temps de prise est court. Cette conclusion, à l'effet que ce sont les particules fines en suspension qui affectent le temps de prise, est compatible avec les conclusions de la figure 6.15 qui démontraient que les ions en solution n'ont pas d'effet significatif sur ce paramètre.

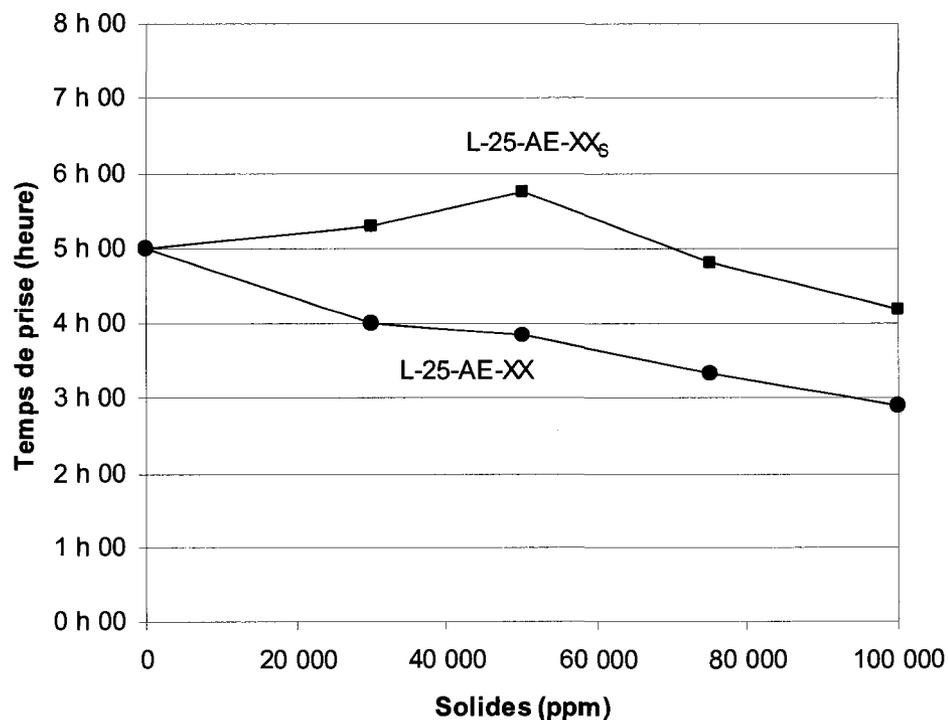


Figure 6.18 – Temps de prise des bétons L-25-AE-XX_s et L-25-AE-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.2.3 Teneur en air du béton frais

Les courbes de la figure 6.19 permettent de mieux comprendre le rôle des particules fines en suspension dans l'eau de gâchage sur le volume d'air entraîné. À la section *Effet des ions en suspension dans l'eau de gâchage* (6.2.2.1), il est montré que plus

la teneur en solides augmente, plus la teneur au air diminue (série L-25-AE-XX). Les résultats de la série L-25-AE-XX_s montrent la même tendance, même si cette dernière relation est moins nette. On peut donc conclure que la perte d'air est due à l'eau recyclée découle principalement de la présence des particules fines en suspension. Ces particules contribuent à augmenter la proportion de particules fines, à diminuer le rapport E/L réel, ce qui diminue l'entraînement d'air.

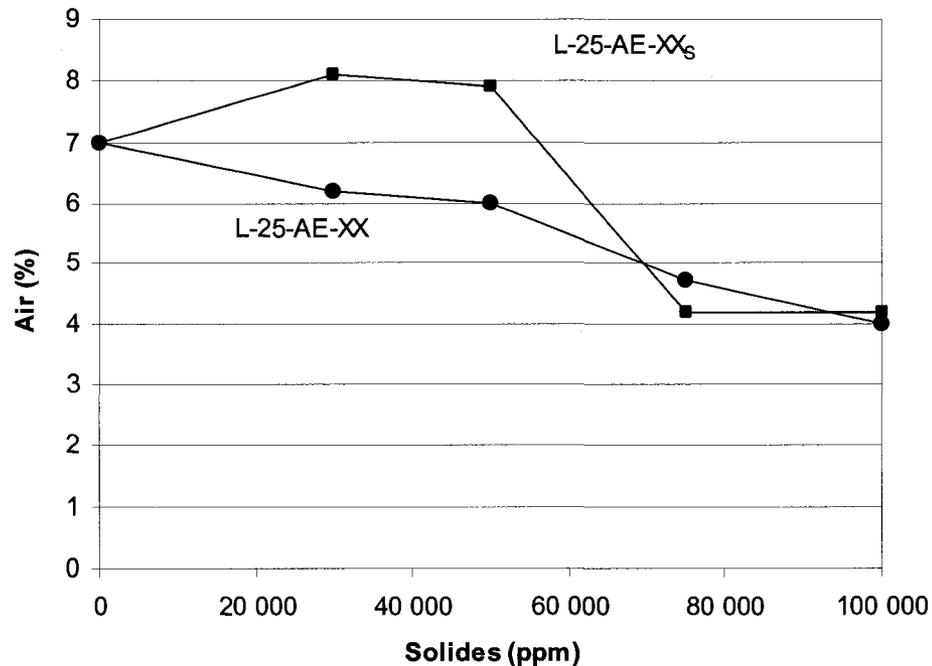


Figure 6.19 – Teneur en air des bétons L-25-AE-XX_s et L-25-AE-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.2.4 Résistance à la compression

À la section résistance à la compression de l'*Effet combiné*, il a été démontré que l'eau recyclée n'a pas d'effet global sur les résistances à la compression à 24 heures et 28 jours. Les résultats de la figure 6.20 confirment cette conclusion.

Globalement, les bétons contenant uniquement les particules fines en suspension dans l'eau recyclée (serie L-25-AE-XXs) ont des résistances à la compression (24h et 28 jours) très similaires à celle des bétons fabriqués avec l'eau recyclée complète (ions en solution et solides en suspension). Ces résultats sont compatibles avec ceux de la figure 6.16 qui démontraient que les ions en solution (considéré séparément) n'engendrent pas non plus d'effet sur les résistances à la compression (24h et 28j).

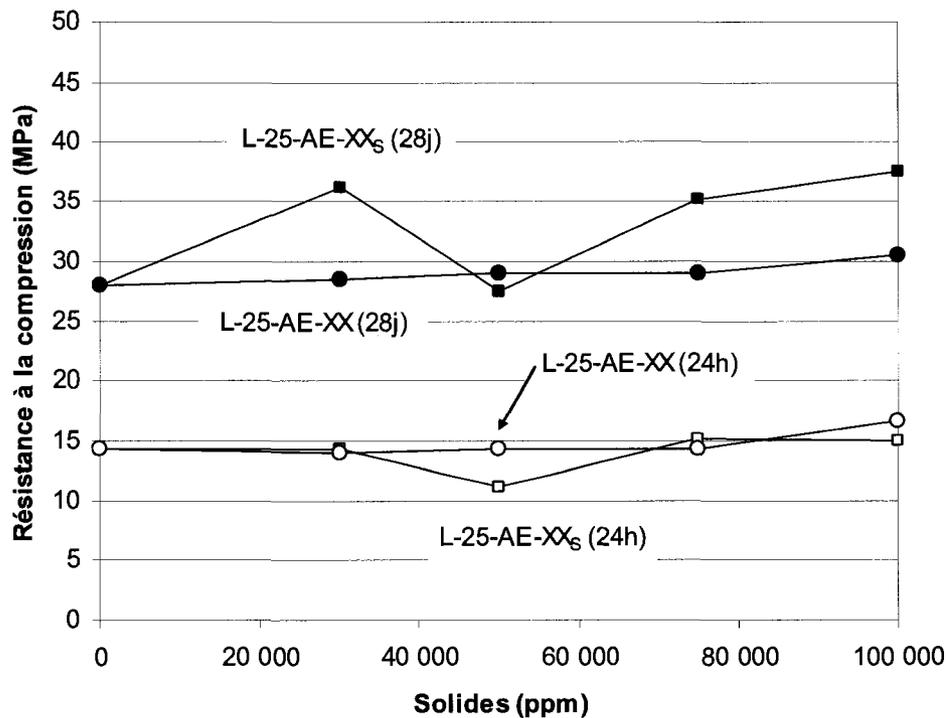


Figure 6.20 – Résistance à la compression des bétons L-25-AE-XX_s et L-25-AE-XX en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

6.2.2.3 Synthèse

Globalement, les résultats des essais réalisés séparément avec la partie liquide de l'eau recyclée et la partie solide de l'eau recyclée démontrent que ce sont les solides qui influencent l'affaissement, l'air entraîné et le temps de prise initial. En conclusion, c'est le rapport E/L réel qui a principalement influencé les propriétés des bétons avec eau recyclée. Plus la teneur en solides augmente, plus le rapport E/L réel diminue car la fraction liquide est remplacée par des solides.

Dans les bétons fabriqués avec une eau de gâchage riche en solides en suspension, la quantité d'eau réelle est donc plus faible, le rapport E/L réel est plus faible et c'est ce plus faible rapport E/L qui influence principalement les propriétés des bétons frais et durci.

6.3 Phase III : Influence de l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués en usine

6.3.1 Bétons frais

Les figures 6.21 et 6.22 présentent l'influence de l'eau recyclée sur le volume d'air entraîné et le temps de prise des bétons de la série C-35-AE. Les résultats de la figure 6.21 montrent que le volume d'air des bétons avec eau recyclée est systématiquement plus faible que celui des bétons témoins. En moyenne, l'utilisation d'eau recyclée engendre une perte relative d'environ 10%, soit environ 0,6% d'air dans les bétons. Les bétons témoins et les bétons avec eau recyclée subissent approximativement les mêmes variations du volume d'air en fonction de la teneur en solides. L'évolution simultanée (béton témoin et béton avec eau recyclée) du volume d'air en fonction de la teneur en solides indique que la teneur en solides n'est pas le seul paramètre qui a influencé la teneur en air. D'autres paramètres de production ont probablement joué un rôle dont notamment la température, l'humidité des granulats et le dosage en eau. Globalement, les résultats montrent que l'utilisation d'eau recyclée diminue le volume d'air entraîné. Cependant, la diminution ne semble pas une résultante de la teneur en solides de l'eau de gâchage.

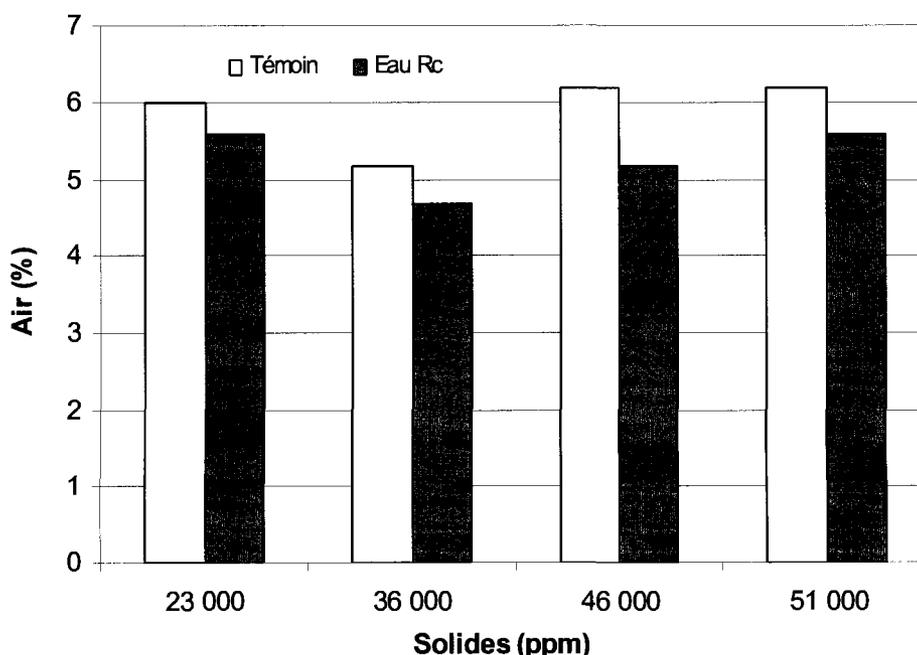


Figure 6.21 – Teneur en air des bétons C-35-AE en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

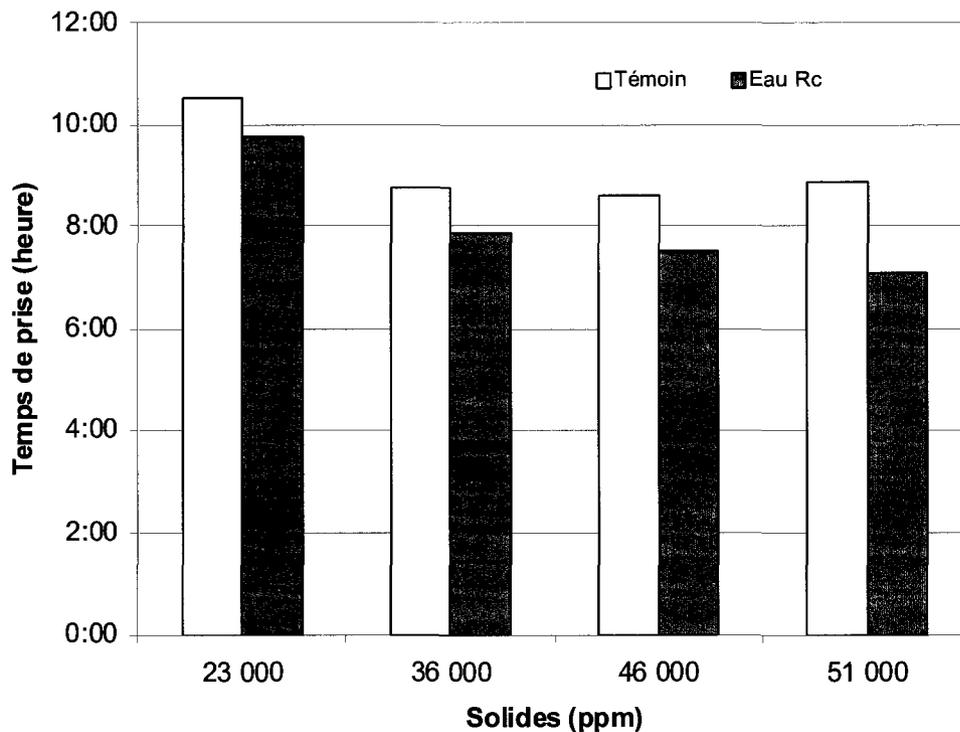


Figure 6.22 – Temps de prise des bétons C-35-AE en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

L'influence de la teneur en solides sur le temps de prise des bétons de la série C-35-AE est présentée à la figure 6.22. Les résultats démontrent que le temps de prise des bétons avec eau recyclée est en moyenne 13% plus court que celui des bétons de référence. Comme dans le cas du volume d'air, les écarts approximativement constants, entre les temps de prise des bétons témoins et des bétons avec eau recyclée, suggèrent que les effets de l'eau recyclée sur le temps de prise ne sont pas proportionnels à la teneur en solides.

Les résultats obtenus à partir des bétons à air entraîné de 25 MPa (C-25-AE) sont très similaires à ceux obtenus avec les bétons à air entraîné de 35 MPa (C-35-AE). Les données des figures 6.23 et 6.24 démontrent que l'utilisation d'eau recyclée diminue systématiquement le volume d'air entraîné et le temps de prise. Cependant, ces diminutions ne sont pas proportionnelles à la teneur en solides dans l'eau de gâchage. En moyenne, l'eau recyclée engendre une diminution relative d'environ 10% du volume d'air, soit une baisse de 0,7% d'air dans le béton, et une diminution d'environ 25% du temps de prise.

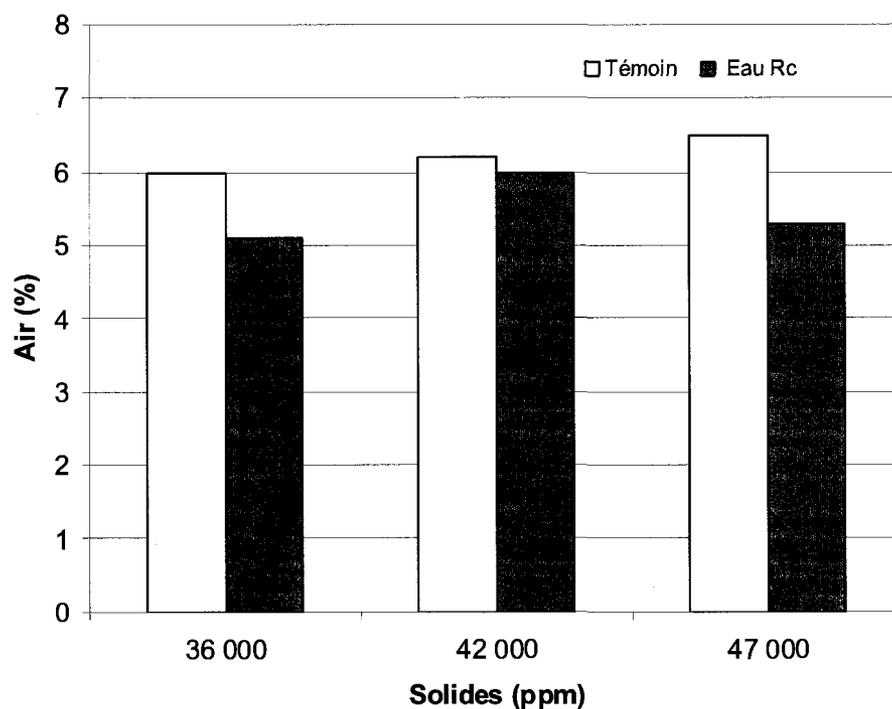


Figure 6.23 – Teneur en air des bétons C-25-AE en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

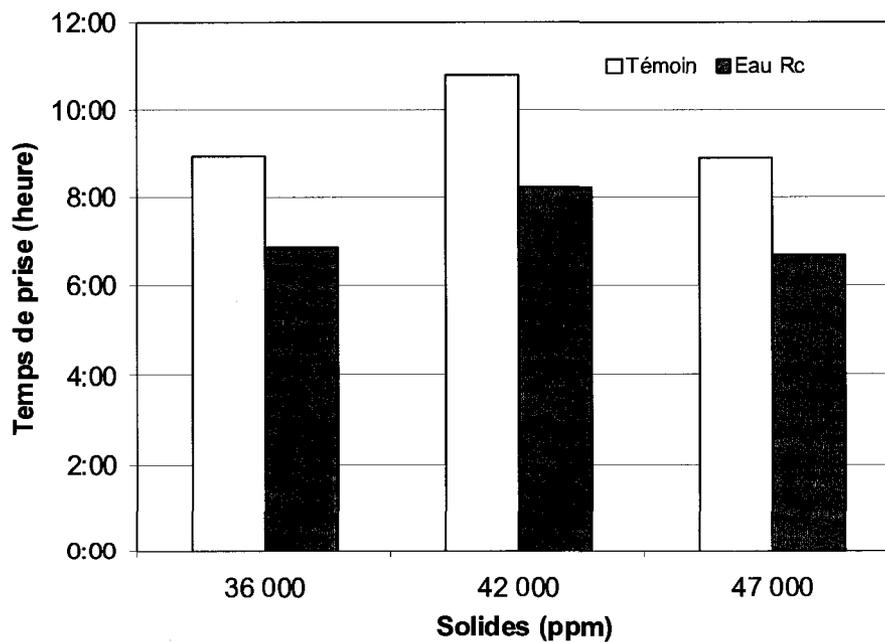


Figure 6.24 – Temps de prise des bétons C-25-AE en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

Les résultats provenant des deux séries de bétons sans air entraîné (C-30-SA et C-25-SA) montrent que l'eau recyclée n'a pas d'effet significatif sur le volume d'air naturellement piégé lors du malaxage (figures 6.25 et 6.27). Dans tous les cas, la différence entre le volume d'air du béton de référence et le volume d'air du béton avec eau recyclée ne dépasse pas 0,3%, quelle que soit la teneur en solides dans l'eau de gâchage.

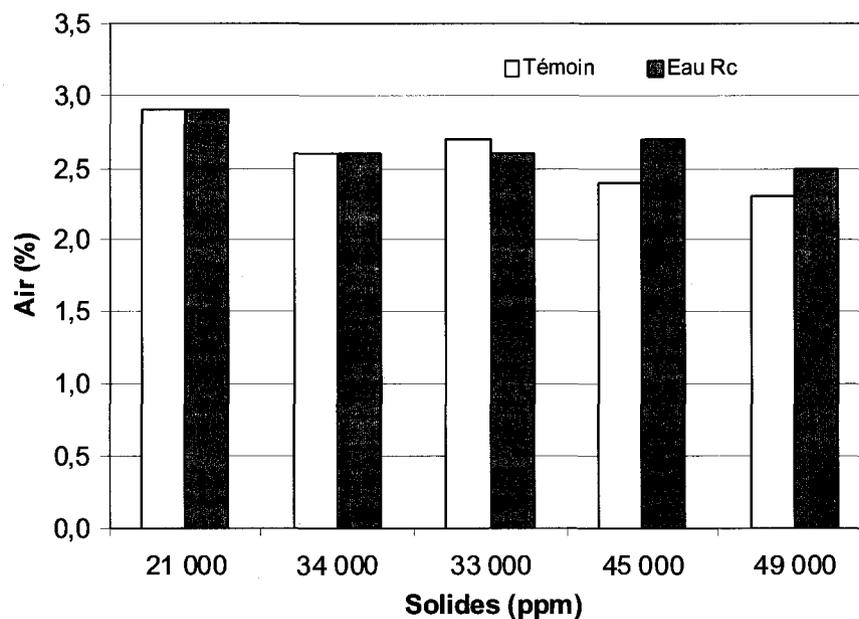


Figure 6.25 – Teneur en air des bétons C-30-SA en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

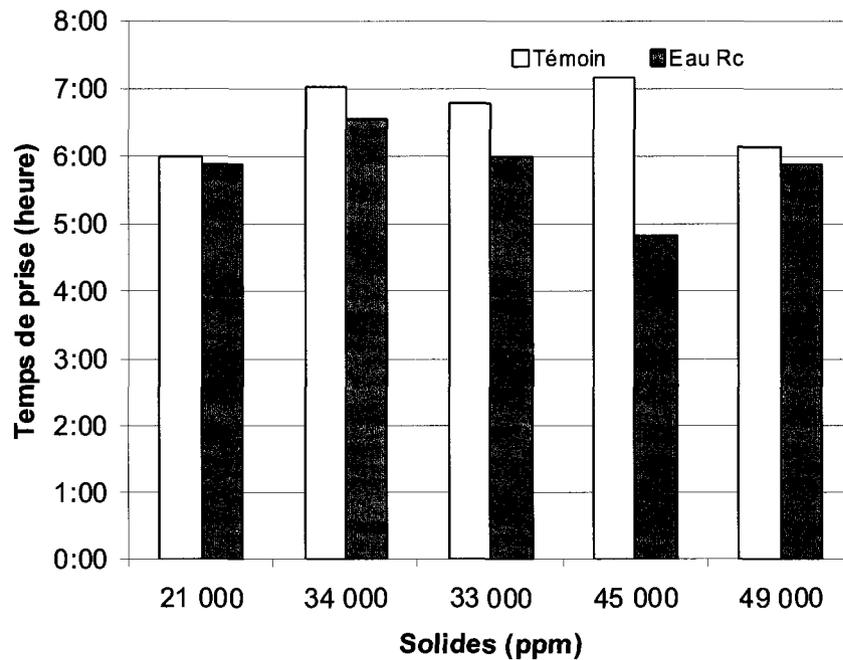


Figure 6.26 – Temps de prise des bétons C-30-SA en fonction de la teneur en solides dans l'eau de gâchage

Comme dans le cas des bétons avec air entraîné, l'utilisation d'eau recyclée diminue le temps de prise des bétons sans air entraîné. Les données des figures 6.26 et 6.28 indiquent que le temps de prise des bétons avec eau recyclée des séries C-30-SA et C-25-SA est systématiquement plus court que celui des bétons de référence. En moyenne, l'utilisation d'eau recyclée diminue le temps de prise d'environ 45 minutes. Comme dans le cas des bétons avec air entraîné, la diminution du temps prise n'est pas proportionnelle à la teneur en solides dans l'eau de gâchage.

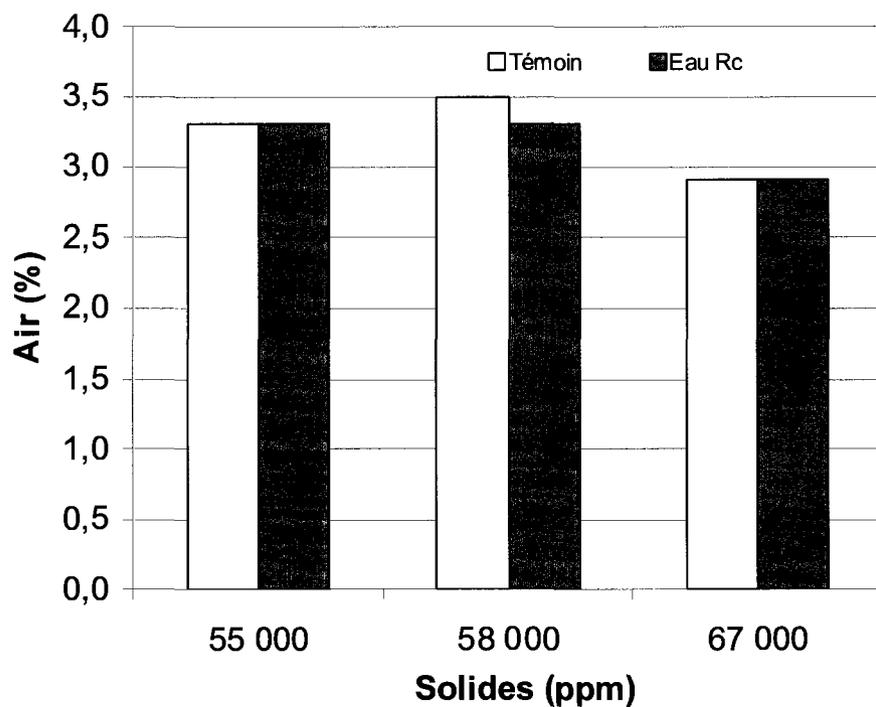


Figure 6.27 – Teneur en air des bétons C-25-SA en fonction de la teneur en solides

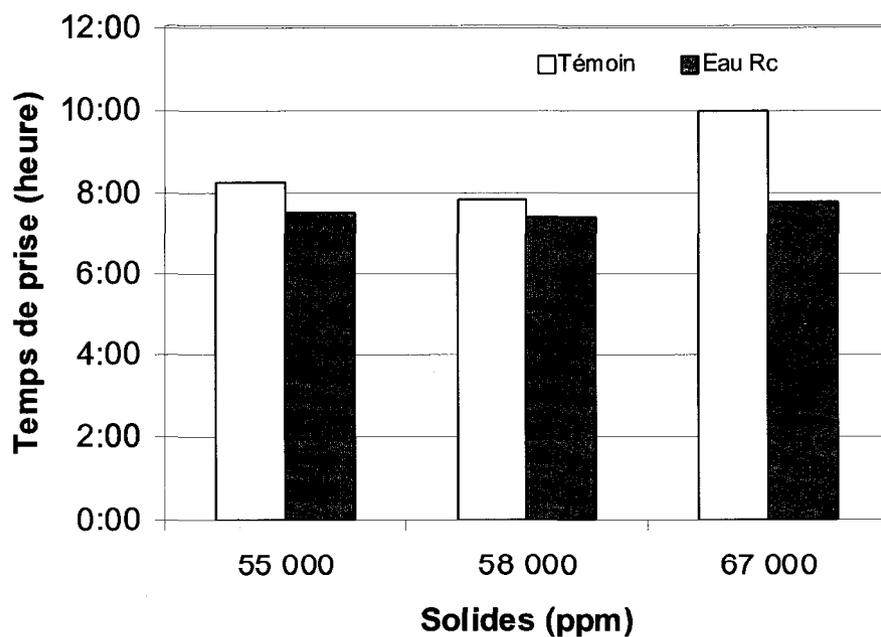


Figure 6.28 – Temps de prise des bétons C-25-SA en fonction de la teneur en solides

6.3.2 Bétons durcis

L'utilisation d'eau recyclée dans les bétons de 35 MPa avec air entraîné (C-35-AE) a produit une légère augmentation des résistances à la compression à 24 h et à 28 j (figure 6.29). L'augmentation de la résistance n'est pas proportionnelle à la teneur en solides dans l'eau de gâchage. Les bétons avec eau recyclée ont une résistance à la compression à 28 j supérieure d'environ 2 à 5 MPa par rapport à celle des bétons de référence. Une partie de cet écart est probablement liée au plus faible volume d'air des bétons avec eau recyclée. Un plus faible volume d'air engendre une augmentation de la résistance des bétons avec eau recyclée. Globalement, les gains de résistance suivent la règle qui indique qu'une perte de 1% d'air provoque une augmentation de 4 à 5% de la résistance à la compression.

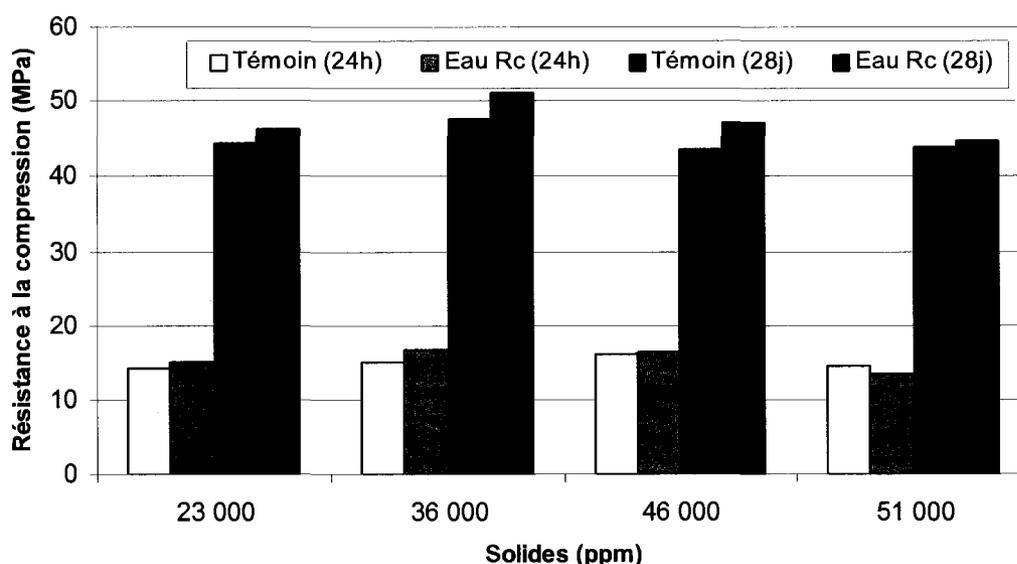


Figure 6.29 – Résistance à la compression des bétons C-35-AE en fonction de la teneur en solides

L'utilisation d'eau recyclée provoque généralement une augmentation de la résistance à la compression des bétons avec air entraîné de 25 MPa (C-25-AE) (figure 6.30). Les effets de l'eau recyclée sont très similaires à ceux observés dans le cas des bétons avec air entraîné de 35 MPa. Les données de la figure 6.30 montrent que les variations de résistance ne sont pas proportionnelles à la teneur en solides dans l'eau de gâchage.

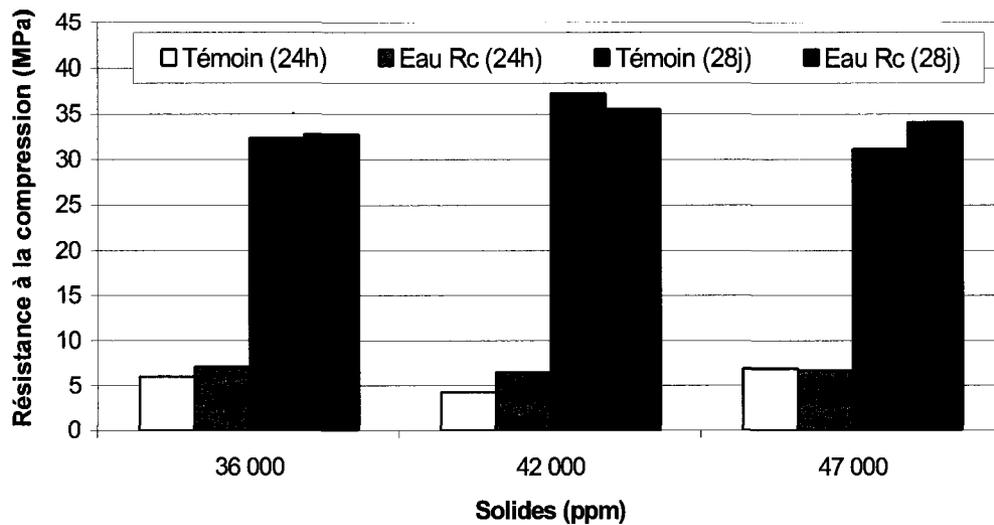


Figure 6.30 – Résistance à la compression des bétons C-25-AE en fonction de la teneur en solides

Dans le cas des bétons sans air entraîné des séries C-30-SA et C-25-SA, l'utilisation d'eau recyclée n'a pas provoqué une augmentation ou une diminution systématique des résistances à la compression à 24 h et à 28 j (figures 6.31 et 6.32). Par rapport aux bétons de référence, on observe de très légères augmentations ou diminutions qui ne sont pas proportionnelles à la teneur en solides dans l'eau de gâchage. Dans tous les cas, la résistance à la compression à 28 jours, des bétons avec eau recyclée, est comprise à l'intérieur d'une plage de $\pm 5\%$ des valeurs obtenues avec les bétons de référence.

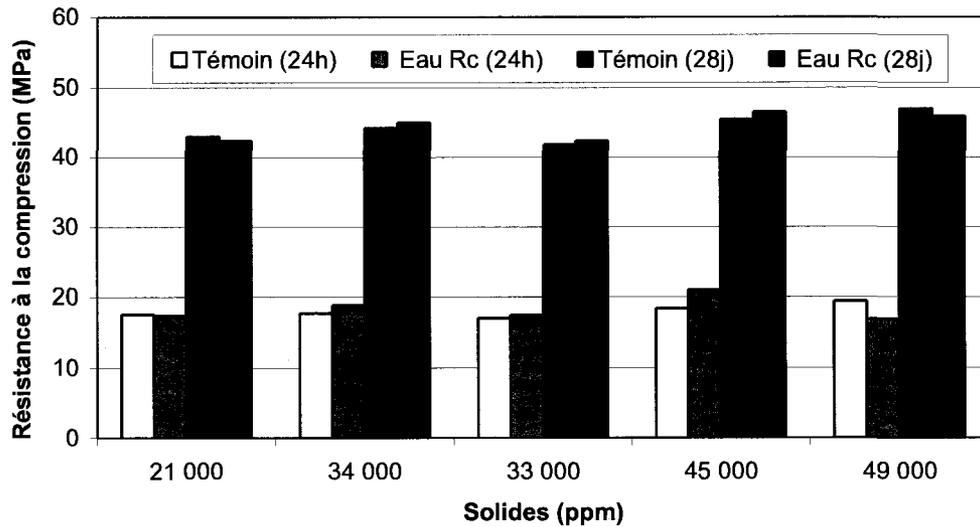


Figure 6.31 – Résistance à la compression des bétons C-30-SA en fonction de la teneur en solides

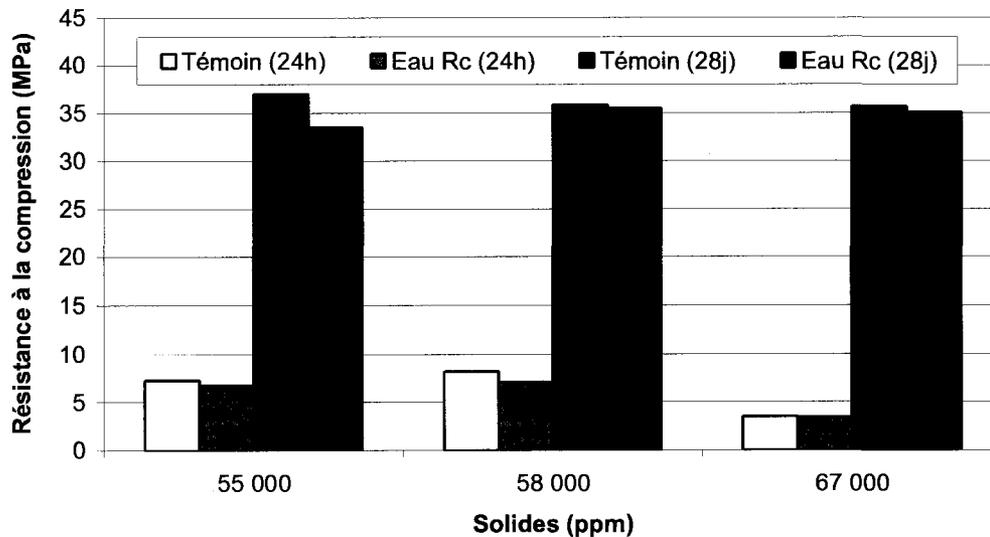


Figure 6.32 – Résistance à la compression des bétons C-25-SA en fonction de la teneur en solides

Certains bétons avec air entraîné de la série C-35-AE ont été soumis à des essais accélérés de durabilité au gel. Les facteurs de durabilité des bétons C-35-AE-46 et C-35-AE-51 sont supérieurs à 100%, ce qui indique que ces bétons possèdent une excellente résistance à la fissuration interne (ASTM C666). Les résultats des essais d'écaillage des bétons C-35-AE-23, C-35-AE-36, C-35-AE-46 et C-35-AE-51 sont

respectivement de 446, 356, 54 et 277 g/m². Ces 4 bétons possèdent donc une bonne résistance à l'écaillage car toutes ces valeurs sont inférieures à la limite maximale de 500 g/m² prescrite par la norme CSA A23.1.

6.3.3 Synthèse

Les quatre séries de béton d'usine ont été produites en imposant un affaissement approximativement constant. Par conséquent, lors du malaxage, un petit ajout d'eau a pu être nécessaire pour atteindre la plage d'affaissement spécifiée. De plus, les bétons d'usine ont été fabriqués avec des teneurs en solides relativement faibles (< 62 000 ppm). Ces deux facteurs font en sorte que le rapport $E/L_{\text{réel}}$ des bétons d'usine diminue relativement peu (0,05) lorsque la teneur en solides augmente. Globalement, les effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons d'usine sont similaires à ceux observés avec les bétons de laboratoire. L'eau recyclée diminue systématiquement le temps de prise de tous les types de béton ainsi que le volume d'air des bétons à air entraîné. Comme dans le cas des bétons de laboratoire, ces baisses résultent probablement de la légère baisse du rapport $E/L_{\text{réel}}$ et de l'augmentation de la teneur en particules fines des bétons contenant de l'eau recyclée. L'absence de proportionnalité entre la teneur en solides et les diminutions du volume d'air et du temps de prise est probablement due à l'imposition d'un affaissement approximativement constant pour chaque série de mélanges. Comme pour les bétons de laboratoire, l'eau recyclée n'a pas provoqué une chute significative de la résistance à la compression. La légère baisse du $E/L_{\text{réel}}$ compense probablement les effets d'une eau de gâchage de moins bonne qualité sur la quantité et la qualité des produits d'hydratation.

Contrairement aux bétons de laboratoire, les bétons de la série C-35-AE possèdent une excellente durabilité au gel (fissuration interne et écaillage). La bonne durabilité des bétons d'usine découle probablement de la meilleure qualité de leur réseau de bulles d'air entraîné qui, dans tous les cas, comporte un volume d'air supérieur à 4,8%. En effet, il est plus facile d'entraîner de l'air en usine puisque les équipements sont plus performants en usine. Il y a donc un meilleur malaxage du béton et les bétons fabriqués en usine comprenaient des mélanges avec des concentrations de solide en suspension plus faible qu'en laboratoire.

Conclusion

Cette étude a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- Il est tout à fait possible d'utiliser des eaux recyclées pour la production de bétons prêts à l'emploi de très bonne qualité. Pour y parvenir, il faut bien contrôler et bien connaître les caractéristiques physico-chimiques de l'eau recyclée (teneurs en chlorures et en sulfates, teneur en matières solides en suspension).
- L'eau recyclée utilisée pour cette étude avait une teneur en chlorures inférieure à 271 mg/L, une teneur en sulfates inférieure à 1211 mg/L, un pH compris entre 11,7 et 12,7 et une teneur en matières solides en suspension variant de 0 à 154 000 ppm. Cette eau recyclée a été mélangée à de l'eau potable pour ainsi produire des eaux de gâchage ayant une teneur en matières solides en suspension comprise entre 0 et 100 000 ppm. À l'exception de la teneur en solides en suspension, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de gâchage (eau potable + eau recyclée) étaient conformes aux spécifications des normes ASTM, CSA et BNQ.
- Les particules en suspension dans l'eau recyclée sont principalement constituées d'hydrates du ciment ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, ettringite, C-S-H) et de fines particules minérales provenant des granulats. La taille des particules est principalement comprise entre 1 et 250 μm .
- Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau recyclées (teneur en chlorures, sulfates, alcalis, solides en suspension) sont très variables sur une base journalière, hebdomadaire et mensuelle. Ces caractéristiques sont principalement influencées par le niveau d'utilisation du recycleur à béton et par le type de béton recyclé. Il n'y a pas de corrélation significative entre la concentration des solides dans l'eau recyclée et les teneurs en chlorures, en sulfates et le pH. Cependant, il a été montré que la concentration en alcalis totaux tend à augmenter avec la concentration en solides en suspension.

- L'importance des effets de l'eau recyclée sur les propriétés du béton frais et durci est principalement associée à la teneur en matières solides en suspension. Plus la concentration des solides en suspension est importante, plus les effets de l'eau recyclée sont importants. C'est à partir de la teneur en solides dans l'eau de gâchage totale (eau recyclée + eau potable) qu'on peut le mieux prévoir et contrôler les effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons frais et durcis.
- Des essais en laboratoire ont démontré que les substances en solution (chlorures, sulfates, alcalis) dans l'eau recyclée ont relativement peu d'effet sur les propriétés du béton (affaissement, temps de prise, entraînement d'air).
- Le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée engendre toujours une baisse de l'affaissement ainsi qu'une diminution du temps de prise et du ressuage. Il a aussi été démontré que l'eau recyclée peut engendrer une diminution du volume d'air entraîné. Plus la teneur en solides en suspension dans l'eau de gâchage augmente, plus ces effets sont importants.
- L'importance des effets de l'eau recyclée augmente avec la classe de résistance à la compression du béton (30, 35 MPa) et avec la baisse du rapport eau/liant. Pour une teneur en solides en suspension donnée (dans l'eau totale), plus le rapport eau/liant est faible, plus les effets de l'eau recyclée sont importants. Par exemple, une eau de gâchage ayant une teneur en matières solides en suspension de 75 000 ppm, engendre une perte d'affaissement environ trois fois plus importante dans un béton de 35 MPa ($E/L=0,41$) que dans un béton de 30 MPa ($E/L=0,58$).
- Le remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée affecte que très peu la résistance à la compression.
- L'analyse de la performance des bétons avec eau recyclée doit prendre en considération les concepts de rapport E/L_{app} et $E/L_{réel}$. Le calcul du E/L_{app}

prend en compte la masse d'eau potable et la masse d'eau recyclée, en y incluant la masse des solides en suspension. Le calcul du $E/L_{\text{réel}}$ n'inclut pas la masse des solides en suspension dans l'eau recyclée. Lors des opérations normales de production, d'une formulation de béton avec eau recyclée, une partie de l'eau de gâchage est remplacée par la même masse d'eau recyclée (incluant les solides en suspension). Par conséquent, le E/L_{app} est constant mais le $E/L_{\text{réel}}$ peut varier en fonction de la teneur en solides de l'eau recyclée ou de la proportion d'eau recyclée dans l'eau de gâchage.

- La plupart des effets de l'utilisation d'eau recyclée sur les propriétés des bétons de laboratoire découlent probablement de la baisse du $E/L_{\text{réel}}$ et de l'apport de particules fines engendrés suite au remplacement d'une partie de l'eau de gâchage par de l'eau recyclée. Ainsi, les diminutions de l'affaissement, du temps de prise et du volume d'air entraîné en fonction de la teneur en solides ont probablement été engendrées par le plus faible dosage en eau ($E/L_{\text{réel}}$) et l'apport de particules fines en suspension.
- Globalement, les effets de l'eau recyclée sur les propriétés des bétons d'usine sont similaires à ceux observés avec les bétons de laboratoire. L'eau recyclée diminue systématiquement le temps de prise de tous les types de béton ainsi que le volume d'air des bétons à air entraîné. Comme dans le cas des bétons de laboratoire, ces baisses résultent probablement de la légère baisse du rapport $E/L_{\text{réel}}$ et de l'augmentation de la teneur en particules fines des bétons contenant de l'eau recyclée.
- L'utilisation d'eau recyclée n'a pas provoqué une chute de la résistance à la compression, probablement en raison de la baisse du $E/L_{\text{réel}}$ qui compense les effets de l'eau de gâchage de moins bonne qualité sur la quantité et la qualité des produits d'hydratation.
- Les essais en laboratoire ont montré que l'utilisation d'eau recyclée peut provoquer une diminution du volume d'air entraîné. Lorsque le volume d'air entraîné est relativement faible (< 4%) et que le béton est exposé à des cycles accélérés de gel-dégel en présence de sels fondants, la résistance à

l'écaillage peut être insuffisante. Des essais en chantier ont cependant démontré que les bétons avec eau recyclée comportant un bon réseau de bulles d'air possèdent une excellente résistance à l'écaillage.

Maintenant que les effets de l'utilisation de l'eau recyclée sont mis en évidence, il est possible d'utiliser de l'eau recyclée comme composante dans plusieurs types de mélange. De plus, en contrôlant les effets engendrés par l'utilisation de l'eau recyclée à l'aide d'adjuvant, les bétons avec eau recyclée auront des propriétés rhéologiques et une durabilité équivalentes aux bétons sans eau recycle.

Cependant, d'autres travaux de recherche devront être entrepris afin de déterminer l'adjuvantation adéquate. Dans une seconde phase de travaux, l'étude servira à compenser les effets de l'eau recyclée en modifiant l'adjuvantation des bétons (utilisation d'un retardateur de prise, augmentation des dosages en réducteur d'eau ou en agent entraîneur d'air, ajout d'un superplastifiant).

Bibliographie

- ASTM C94 – 00 *Standard specification for ready-mixed concrete*, Annual book of ASTM Standards, Volume 04.02, Concrete and Aggregates, 43-52 p.
- Borger, J., Carrasquillo, R.L., Fowler, D.W. (1994) *Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete*, Advanced cement based materials, Vol. 1, no 6, p. 267-274.
- Chatveera, B. Lertwattanakul, P., Makul, N., (2005) *The effects of sludge water on mechanical properties and durability of concrete*, CONMAT'05, N. Banthia et T. Uomoto Éditeurs, Vancouver, 22-24 août, 14 p.
- CSA A23.1-00, *Béton : constituant et exécution des travaux*, Canadian Standards Association, Toronto, Canada, 164 p.
- InforBloc (2005) *Recycler le béton frais, un enjeu écologique*, Journal de Ciment St-Laurent, Vol. 22, no 2, Supplément *Momentum*, 4 p.
- Jawed, I., Skalny, J. (1978) *Alkalies in cement : A review*, Cement and concrete research, Vol. 8, no 1, p.37-52.
- NQ 2621-900 2004, *Bétons de masse volumique normale et constituants*, Bureau de normalisation du Québec, Québec, Canada, 29 p.
- Odler, I., Wonnemann, R. (1983) *Effect of alkalies on Portland cement hydration II. Alkalies present in form of sulfates*, Cement and concrete research, Vol. 13, no 6, p. 771-777.
- Sandrolini, F., Franzoni, E. (2000) *Waste water recycling in ready-mixed concrete plants*, Cement and concrete research, vol. 31, 485-489 p.
- Su, N., Miao B., Liu F.-S. (2002), *Effect of wash water and underground water on properties of concrete*, Cement and concrete research, vol. 32, 777-782 p.
- Vickers, G. (2002) *Gray-water recycling basics*, Concrete producer, Vol. 20, no 9, 31-33 p.
- Vickers, G. (2003) *Gray water recycling – Tips on how concrete producers should evaluate recycling equipment and process*, Concrete producer, Vol. 21, no 4, 32-35 p.
- Liebherr concrete recycling plants; Ready mix recycling? Storm water management? BIBKO system

Smaoui, N., Bérubé, M.A., Fournier, B., Bissonnette, B., Durand, B. (2005) *Effects of alkalis addition on the mechanical properties and durability of concrete*, Cement and concrete research, Vol. 35, no 2, p. 203-212.

Pigeon, M., Plante, P., Pleau, R., 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, no 1, p 24-31.

Annexe A : Calcul des ppm et de la densité

ANNEXE A:

- Calcul de la quantité d'eau recyclée nécessaire pour un mélange

Exemple pour un mélange à 50 000 ppm :

Nombre de ppm désiré : 50 000 ppm
Quantité d'eau totale pour le mélange : 13,3L
Concentration des solides dans l'eau utilisée : 110000 ppm

$$50000_{mg/L} \times 13,3_L = 665000_{mg}$$
$$665000_{mg} \div 110000_{mg/L} = 6,045_L$$

Donc 6,05 L d'eau recyclée est nécessaire afin d'avoir une eau de gâchage contenant 50 000ppm et 7,25 L d'eau potable.

- Calcul de la densité à partir du nombre de ppm

Eau recyclée : 110 000 ppm
Quantité d'eau total (solide + liquide) : 6,38L

6380g x 11% de solide = 701,8 g de solides
Densité des solides 2,1
701,8g / 2100g/L = 0,334L de solides

6,380L – 0,334L = 6'046L d'eau
Densité de l'eau 1,0
6046g d'eau

Masse totale = 701,8g + 6046g = 6747,8g
Densité = masse / volume
Densité = 6,7478kg / 6,38L
Densité = 1,058