

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**"LES RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS:
ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES ADDITIFS MINÉRAUX DANS DIVERS
MÉLANGES DE MORTIER EN ESSAI D'EXPANSION ACCÉLÉRÉ"**

par

Luc SAINT-PIERRE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE MAÎTRE
ES SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)
(GÉNIE MINÉRAL)**

JUIN 1990

c Luc Saint-Pierre 1990

CA2PQ

UP 8

1990

S149

National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Canadian Theses Service Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

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

ISBN 0-315-58957-4

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

"LES RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS:

**ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES ADDITIFS MINÉRAUX DANS
DIVERS MÉLANGES DE MORTIER EN ESSAI D'EXPANSION ACCÉLÉRÉ"**

Présenté par: Luc Saint-Pierre

en vue de l'obtention du grade: Maître es Sciences Appliquées (M.Sc.A.)

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. Jules Houde, Ph. D., président

M. Jean Bérard, Ph. D.

M. Richard Roux, M. Sc. A.

M. Benoit Durand, Ph. D.

RÉSUMÉ

Nous nous sommes proposés au début de la présente étude d'approfondir une nouvelle méthode accélérée de détection de la réactivité des granulats à béton. Cette méthode, dont les conditions de cure catalysent la réaction alcalis-granulats, fut suggérée en 1986 par deux chercheurs sud-africains. En effet, l'immersion de barres de mortier dans une solution de soude à 80° C permet d'obtenir des expansions significatives à douze jours.

Puisque les mécanismes chimiques associés aux réactions alcalis-granulats peuvent être contrés par l'action pouzzolanique et/ou imperméabilisante de certains additifs, nous avons soumis trois de ceux-ci et quatre granulats à la cure du nouvel essai. Pour ce faire, nous avons réalisé plusieurs mélanges de mortier dans lesquels nous avons remplacé une partie du ciment par des additifs. Les deux additifs minéraux utilisés, une fumée de silice condensée et un laitier silicaté granulé, sont reconnus pour leurs propriétés pouzzolaniques. De plus, nous avons utilisé un additif chimique, le carbonate de lithium, dans quelques mélanges. Les mélanges furent réalisés avec quatre granulats différents: un calcaire, un tuf rhyolitique, un schiste chloriteux et une dolomie.

Nous avons soumis les mêmes mélanges à la cure de l'essai ASTM C227 afin de pouvoir comparer les effets des différents additifs.

Nos résultats démontrent que la fumée de silice et le laitier silicaté granulé se comportent de façon similaire pour les deux types de cure. Toutefois, notons que contrairement à l'essai accéléré, l'essai ASTM C227 ne parvient pas à détecter la réactivité de trois granulats.

De plus, les résultats obtenus avec l'ajout de carbonate de lithium sont contradictoires d'un essai à l'autre. Par ce fait, nous sommes tenté de croire que la porosité/perméabilité des barres de mortier joue un rôle de premier plan face à l'infiltration de la solution de soude de l'essai accéléré. Un tel additif ne peut d'après nos résultats être utilisé avec la cure de l'essai accéléré sans une étude plus détaillée de l'impact de la porosité et de l'évolution des teneurs en Ca(OH)_2 .

ABSTRACT

Our main objective at the onset of this study was to further the research into a new accelerated method of detecting the reactivity of concrete aggregates. This method, which uses a curing solution which catalyzes the alkali-aggregate reaction, was suggested in 1986 by two South African researchers. In fact, immersing mortar bars in a sodium hydroxide solution at 80° C produces significant expansions after twelve days.

Since the chemical mechanisms associated with the alkali-aggregate reactions can be counteracted by the pozzolanic and/or permeability reduction action of certain mineral additives, we subjected three of these admixtures and four aggregates to the curing conditions of the new test. To this end, we prepared several mortar mixtures into which cement powder was partially replaced by additives. The three mineral additives which were used, that is a condensed silica fume, a granulated blast-furnace slag and a lithium carbonate powder, are well known for their pozzolanic characteristics. The mixtures were produced with four different aggregates: a limestone, a rhyolitic tuff, a chloritic schist and a dolomite.

The same mixtures were also subjected to the ASTM C227 curing conditions in order to compare the effects of the different additives.

Our results indicate that the condensed silica fume and the granulated blast-furnace slag react similarly to the two types of curing environment. However, we also note that, contrary to the accelerated test, the original ASTM C227 test was not able to detect the reactivity of three of the aggregates tested in the present research.

Furthermore, the results obtained with the addition of lithium carbonate are contradictory from one test to the other. In view of this fact, we are tempted to believe that the porosity/permeability of the mortar bars plays a primary role in affecting the infiltration of the sodium hydroxyde curing solution used for the accelerated test. According to our results, such an additive cannot be used with the curing solution of the accelerated test without first studying in more detail the impact that the porosity and the evolution of the Ca(OH)_2 content play in the test.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Jean Bérard Ph.D., professeur titulaire de Génie Minéral et M. Richard Roux, Ing., M.Sc.A., professeur agrégé au département de Génie Civil qui ont été les directeurs de cette étude, et qui, par leurs conseils et par leur soutien, ont grandement contribué à ce projet.

Je tiens à remercier la Compagnie Graybec, Division Jolichaux pour son soutien financier et tout particulièrement Messieurs Jean-Pierre Gilardeau, Richard Plante et Jean-Pierre Loyer.

Je désire également remercier le Laboratoire de Construction 2000 Inc. pour son soutien financier et technique et tout particulièrement Messieurs Micheal Dupuis et Daniel Frigon.

Je désire remercier M. Benoit Durand, Ph. D., pour sa précieuse collaboration tout au long des travaux reliés à cette étude. Ses commentaires et conseils ainsi que ceux de Mme. Lise Laurence ont été grandement appréciés.

Enfin, je désire remercier le personnel de l'Ecole Polytechnique et plus

particulièrement le personnel des départements de Génie Minéral et de Génie Civil.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT.....	vi
REMERCIEMENTS.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	xvi
LISTE DES TABLEAUX.....	xxvi
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xxvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 TRAVAUX ANTÉRIEURS.....	1
1.2 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE EFFECTUÉE.....	3
CHAPITRE 2 LE CIMENT PORTLAND.....	7
2.1 L'ORIGINE DU CIMENT PORTLAND.....	7
2.2 LA FABRICATION DU CIMENT PORTLAND.....	9
2.3 LA CHIMIE DE L'HYDRATATION DU CIMENT	
PORTLAND.....	10
2.4 LE PROCESSUS D'HYDRATATION.....	13

2.5 LA CONSTITUTION DE LA PÂTE DURCIE.....	16
CHAPITRE 3 LES RÉACTIONS' ALCALIS-GRANULATS.....	18
3.1 HISTORIQUE.....	18
3.2 LES CONDITIONS ESSENTIELLES AUX RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS.....	19
3.3 LES TYPES DE RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS.....	20
3.3.1 Les mécanismes de la réaction alcalis-silice.....	21
3.3.2 Les mécanismes de la réaction alcalis-carbonates.....	28
CHAPITRE 4 LES AJOUTS MINÉRAUX.....	31
4.1 INTRODUCTION.....	31
4.2 HISTORIQUE.....	32
4.3 ASPECT ÉCONOMIQUE.....	33
4.4 LES TYPES D'AJOUTS MINÉRAUX.....	33
4.4.1 Les cendres volantes.....	36
4.4.2 Les laitiers de haut fourneau.....	37
4.4.3 Les fumées de silice condensées.....	40
4.5 LES EFFETS DES AJOUTS DANS LE PROCESSUS DE LA RÉACTION ALCALIS-GRANULATS.....	43

CHAPITRE 5 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA RÉACTIVITÉ

ALCALIS-GRANULATS.....	48
5.1 REVUE DES MÉTHODES NORMALISÉES.....	48
5.1.1 L'examen pétrographique (ASTM C227).....	48
5.1.2 L'essai des cylindres de roche (ASTM C586).....	49
5.1.3 L'essai chimique (ASTM C289).....	50
5.1.4 L'essai des barres de mortier (ASTM C227).....	51
5.1.5 L'essai d'expansion de prismes de béton (ACNOR A23.2-14A).....	52
5.2 LES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX.....	53
5.2.1 Les essais à l'autoclave.....	54
5.2.2 L'essai Duggan.....	55
5.2.3 L'essai chimique de changement de volume.....	56
5.2.4 Barres immergées dans une solution de NaCl.....	57
5.2.5 La méthode chimique modifiée.....	58
5.2.6 L'essai accéléré par durcissement dans une solution de NaOH à 80°C.....	58
5.2.7 L'essai accéléré d'expansion de barres de mortier.....	59
5.2.8 L'essai accéléré d'expansion de prismes de béton.....	59
5.2.9 L'essai accéléré d'expansion de mini-prismes de roches.....	60

5.3 ÉVALUATION DE L'ESSAI ACCÉLÉRÉ

D'EXPANSION DES BARRES DE MORTIER..... 61

5.3.1 Historique..... 61

5.3.2 Évaluation des manipulations de l'essai accéléré..... 62

5.3.3 Méthodologie de l'essai accéléré..... 65

CHAPITRE 6 PÉTROGRAPHIE DES GRANULATS..... 70

6.1 DESCRIPTION DES GRANULATS..... 70

6.2 CALCAIRE D'OTTAWA..... 71

6.3 TUF RHYOLITIQUE DE BEAUCEVILLE..... 73

6.4 SCHISTE CHLORITEUX DE SHERBROOKE..... 75

6.5 DOLOMIE DE VALLEYFIELD..... 77

CHAPITRE 7 RÉSULTATS..... 80

7.1 RÉSUMÉ..... 80

7.2 CALCAIRE D'OTTAWA..... 84

7.2.1 Calcaire d'Ottawa versus FSC..... 84

7.2.2 Calcaire d'Ottawa versus LSG..... 92

7.2.3 Calcaire d'Ottawa versus Li_2CO_3 99

7.3 TUF RHYOLITIQUE DE BEAUCEVILLE..... 107

7.3.1 Tuf rhyolitique versus FSC..... 107

7.3.2 Tuf rhyolitique versus LSG.....	114
7.4 SCHISTE CHLORITEUX DE SHERBROOKE.....	121
7.4.1 Schiste chloriteux versus FSC.....	121
7.4.2 Schiste chloriteux versus LSG.....	128
7.5 DOLOMIE DE VALLEYFIELD.....	135
7.5.1 Dolomie de Valleyfield versus FSC.....	135
7.5.2 Dolomie de Valleyfield versus LSG.....	142
7.6 EFFETS DES ADDITIFS SUR LA RÉACTIVITÉ DES GRANULATS.....	149
7.7 CORRÉLATIONS ENTRE L'ESSAI ASTM C227 ET L'ESSAI ACCÉLÉRÉ.....	159
7.8 SOMMAIRE DES RÉSULTATS.....	165
 CHAPITRE 8 RÉSULTATS DES OBSERVATIONS EFFECTUÉES AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE.....	171
8.1 LES PRODUITS DE RÉACTIONS.....	171
8.2 RÉSULTATS.....	175
 CHAPITRE 9 CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	186
 BIBLIOGRAPHIE.....	197

ANNEXE A. SPÉCIFICATIONS.....	207
ANNEXE B. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS D'EXPANSION.....	210

LISTE DES FIGURES

FIGURE:	PAGE
1- Programme d'essais.....	6
2- Vitesse d'hydratation des constituants du ciment.....	11
3- Vitesse de prise des constituants du ciment.....	11
4- Evolution de la température d'hydratation du ciment.....	13
5- Processus de la formation de la membrane semi- perméable et des fibrilles de C-S-H.....	15
6- Formation des liens entre les grains de ciment et formation de cristaux de portlandite.....	15
7- Courbe de la solubilité de la silice.....	22
8- Différence entre une silice bien cristallisée et une silice faiblement cristallisée.....	24
9- Attaque d'une silice peu cristallisée par des hydroxydes d'alcalis.....	25
10- Diagramme ternaire des ajouts minéraux.....	35
11- Appareil de mesure des barres de mortier.....	68
12- Contenant type servant à l'entreposage des barres de mortier pour l'essai ASTM C227.....	68
13- Vue extérieure de la cuve isolée servant à la cure à 80°C de l'essai accéléré.....	69
14- Contenant type servant à l'entreposage des barres de mortier pour la cure de l'essai accéléré.....	69

FIGURE:	PAGE
15- Calcaire d'Ottawa en lame mince.....	72
16- Calcaire d'Ottawa en lame mince avec fossile silicifié.....	72
17- Tuf rhyolitique de Beauceville en lame mince.....	74
18- Tuf rhyolitique de Beauceville en lame mince.....	74
19- Schiste chloriteux de Sherbrooke en lame mince.....	76
20- Schiste chloriteux de Sherbrooke en lame mince.....	76
21- Dolomie de Valleyfield en lame mince.....	79
22- Dolomie de Valleyfield en lame mince.....	79
23- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats d'Ottawa et la fumée de silice condensée pour l'essai ASTM.....	87
24- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats d'Ottawa et la fumée de silice condensée pour l'essai accéléré.....	88
25- Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.....	89
26- Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.....	90

FIGURE:	PAGE
27- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice pour le calcaire d'Ottawa.....	91
28- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats d'Ottawa et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.....	94
29- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats d'Ottawa et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.....	95
30- Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.....	96
31- Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.....	97
32- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour le calcaire d'Ottawa.....	98
33- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats d'Ottawa et le carbonate de lithium pour l'essai ASTM.....	102
34- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats d'Ottawa et le carbonate de lithium pour l'essai accéléré.....	103
35- Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de Li_2CO_3 pour l'essai ASTM C227.....	104

FIGURE:	PAGE
36- Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de Li_2CO_3 pour l'essai accéléré.....	105
37- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le carbonate de lithium pour le calcaire d'Ottawa.....	106
38- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec la granulats de Beauceville et la fumée de silice condensée pour l'essai ASTM.....	109
39- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec la granulats de Beauceville et la fumée de silice condensée pour l'essai accéléré.....	110
40- Tendance des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.....	111
41- Tendance des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.....	112
42- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice condensée pour le tuf de Beauceville.....	113
43- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Beauceville et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.....	116
44- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Beauceville et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.....	117

FIGURE:	PAGE
45- Tendance des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.....	118
46- Tendance des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.....	119
47- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour le tuf de Beauceville.....	120
48- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Sherbrooke et la fumée de silice condensée pour l'essai ASTM.....	123
49- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Sherbrooke et la fumée de silice condensée pour l'essai accéléré.....	124
50- Tendance des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.....	125
51- Tendance des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.....	126
52- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice condensée pour le schiste de Sherbrooke.....	127
53- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Sherbrooke et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.....	130

FIGURE:	PAGE
54- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Sherbrooke et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.....	131
55- Tendance des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.....	132
56- Tendance des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.....	133
57- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour le schiste de Sherbrooke.....	134
58- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Valleyfield et la fumée de silice condensée pour l'essai ASTM.....	137
59- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Valleyfield et la fumée de silice condensée pour l'essai accéléré.....	138
60- Tendance des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.....	139
61- Tendance des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.....	140
62- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice condensée pour la dolomie de Valleyfield.....	141

FIGURE:	PAGE
63- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Valleyfield et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.....	144
64- Évolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Valleyfield et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.....	145
65- Tendance des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.....	146
66- Tendance des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.....	147
67- Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour la dolomie de Valleyfield.....	148
68- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulats d'Ottawa pour l'essai ASTM C227.....	151
69- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulats d'Ottawa pour l'essai accéléré.....	152
70- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulats de Beauceville pour l'essai ASTM C227.....	153
71- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulats de beauceville pour l'essai accéléré.....	154
72- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulats de Sherbrooke pour l'essai ASTM C227.....	155
73- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulats de Sherbrooke pour l'essai accéléré.....	156

FIGURE:	PAGE
74- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulat de Valleyfield pour l'essai ASTM C227.....	157
75- Tendance moyenne des différents additifs avec le granulat de Valleyfield pour l'essai accéléré.....	158
76- Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de FSC pour l'essai ASTM C227.....	161
77- Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de FSC pour l'essai accéléré.....	162
78- Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de LSG pour l'essai ASTM C227.....	163
79- Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de LSG pour l'essai accéléré.....	164
80- Photographie de pores d'un mortier confectionné avec le schiste de Sherbrooke et 15% de FSC.....	172
81- Photographie de pores remplis de gel de silice.....	172
82- Vue rapprochée d'un pore remplis de gel de silice.....	173
83- Exsudation du gel de silice sur les surfaces externes des barres de mortier.....	173
84- Photographie prise au MEB illustrant de la FSC.....	177
85- Photographie prise au MEB illustrant de la FSC.....	177
86- Photographie prise au MEB d'un cristal de LSG.....	178

FIGURE:	PAGE
87- Spectre de l'analyse par fluorescence-X du LSG.....	178
88- Photographie prise au MEB d'un cristal de portlandite dans le mortier.....	179
89- Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la portlandite de la figure 88.....	179
90- Photographie prise au MEB illustrant des "écailles" de gel de silice formé dans un pore.....	180
91- Photographie prise au MEB d'une vue rapprochée de la figure 90.....	180
92- Photographie prise au MEB d'un gel de silice de texture "frippée".....	181
93- Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la figure 92.....	181
94- Photographie prise au MEB montrant les aiguilles présentes sur le gel siliceux.....	182
95- Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la figure 94.....	182
96- Photographie prise au MEB illustrant un gel de silice formé dans un pore.....	183
97- Photographie prise au MEB d'une vue rapprochée de la figure 96.....	183
98- Photographie prise au MEB d'écailles de dessication du gel de silice.....	184
99- Photographie prise au MEB d'une vue montrant l'épaisseur des écailles du gel de silice.....	184

FIGURE:	PAGE
100-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la figure 98.....	185
101-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la figure 99.....	185
102-Relation entre les expansions de l'essai ASTM C227 et de l'essai accéléré obtenues avec l'additif FSC pour une "nouvelle" limite de 0.033%.....	190
103-Relation entre les expansions de l'essai ASTM C227 et de l'essai accéléré obtenues avec l'additif LSG pour une "nouvelle" limite de 0.033%.....	191
104-Relation entre l'essai accéléré et l'essai ASTM C227 avec l'utilisation de fumée de silice condensée comme additif.....	195
105-Relation entre l'essai accéléré et l'essai ASTM C227 avec l'utilisation du laitier silicaté granulé comme additif.....	196

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	PAGE
1- Résumé des mélanges de mortier pour chaque granulat.....	81
2- Équations des régressions.....	167

LISTES DES ABRÉVIATIONS

Å	: Angstroem (10^{-10} mètre)
A	: Al_2O_3
ASTM	: American Society for Testing and Materials
C	: CaO
cm	: Centimètre
CSA	: Association canadienne de normalisation
C-S-H	: Silicates de calcium hydratés
C/S	: CaO/SiO_2
CTL	: Contrôle
E/C	: rapport eau/ciment en poids
éq.	: Equivalent
F	: Fe_2O_3
FSC	: Fumée de silice condensée
H	: H_2O
kg	: Kilogramme
LSG	: Laitier silicaté granulé
M	: MgO
MEB	: Microscope électronique à balayage
MPa	: Mégapascal
m²/kg	: Mètre carré/kilogramme

- N** : Normalité (nombre d'équivalents-gramme de soluté
dans 1000 cm³ de solution)
- S** : SiO₂
- μm** : Micromètre

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 TRAVAUX ANTÉRIEURS

De nos jours, il est reconnu que les dommages provoqués aux structures de béton par les réactions alcalis-granulats peuvent être considérables. Il est également reconnu qu'il s'agit d'un phénomène qui se manifeste à l'échelle mondiale. Des sommes énormes ont déjà été investies en vue d'éliminer ou de diminuer les dommages causés par ces réactions aux structures de béton.

Les granulats, constituant environ 65% en poids des structures de béton, jouent un rôle déterminant dans la réaction alcalis-granulats. Comme le mentionne Deloye (1983):

" Il faut comprendre que les granulats sont extraits de gisements où les minéraux de la roche ont atteint un équilibre sur une période allant de quelques milliers à quelques centaines de millions d'années. Cet équilibre concerne en particulier le pH du milieu environnant, proche de la neutralité voire même acide. Lors de la fabrication du béton, ces

minéraux sont brutalement plongés dans un milieu dont le pH est voisin de 12,5, donc très basique. Il s'en suit une rupture d'équilibre thermodynamique qui favorise les réactions tendant vers un nouvel équilibre, réactions qui se situent à l'interface pâte-granulats. L'évolution sera d'autant plus lente que les surfaces offertes aux réactions seront plus faibles, que les minéraux présents seront plus proches du nouvel équilibre et que les circulations d'eau seront limitées."

Il devient donc primordial de bien connaître la nature des granulats utilisés dans les ouvrages à base de ciment Portland.

Plusieurs méthodes sont déjà utilisées pour déterminer le potentiel de réactivité des granulats (Grattan-Bellew, 1981). Il existe plusieurs essais normalisés qui peuvent être effectués sur des granulats susceptibles de réagir avec les alcalis du ciment Portland.

En général, ce sont les essais d'expansion de barres de mortier et de prismes de béton qui sont les plus utilisés et les plus fiables. Habituellement, la durée de ces essais est de six à douze mois. R.E. Oberholster et G. Davies (1986) proposèrent un essai d'expansion accéléré effectué sur une période de douze jours. Cet essai a déjà fait l'objet d'un mémoire de maîtrise à l'Ecole Polytechnique de Montréal (Blanchette, 1989) et s'est avéré efficace sur des granulats québécois.

Parallèlement, on a démontré la possibilité de contrer le processus de la réaction en incorporant au mélange de béton des additifs minéraux de nature pouzzolanique. Durand (1985, 1988) a observé des diminutions d'expansion en ajoutant divers additifs dans les mélanges de béton.

1.2 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE EFFECTUÉE

Présentement, l'industrie du granulat à béton est aux prises avec un problème de délai: souvent, les fournisseurs de granulats ne peuvent se permettre un délai comme le nécessite les essais d'expansion présentement utilisés pour évaluer le potentiel de réactivité des granulats.

Il faut donc se tourner vers de nouveaux essais fiables et, surtout, rapides. Par l'entremise de ces essais, l'industrie du granulat sera mieux servie et l'utilisation de granulats potentiellement réactifs, faute de temps, sera éliminée. Il nous est donc apparu intéressant de compléter les recherches qu'avaient débutées initialement Van Aardt et Visser (1982), Oberholster et Davies (1986, 1986a) ainsi que Blanchette (1989) sur l'essai accéléré.

Nous savons qu'il est nécessaire de connaître plusieurs aspects d'un essai avant que celui-ci soit normalisé. Les résultats obtenus par les chercheurs

précédents sont très révélateurs quant à la fiabilité et à la rapidité de ce nouvel essai. L'apport d'autres observations relatives à cet essai contribue à donner plus de considérations aux recherches précédentes. Dans ce sens, nous avons recueilli de nouvelles données en réalisant des mélanges de mortier auxquels on a ajouté différents additifs minéraux.

Le but premier de la présente étude est l'observation de l'effet de divers additifs incorporés à des mélanges de mortier en utilisant les conditions de cure de l'essai Sud-Africain proposé par R.E. Oberholster (1986). La cure particulièrement sévère de cet essai consiste à immerger les barres de mortier dans une solution de NaOH de 1 N à une température de 80° C. A la lumière des résultats obtenus, nous pourrions évaluer si l'activité pouzzolanique telle que reconnue par Durand (1985, 1988) perdure sous les conditions de cure de l'essai accéléré. Nous serons donc en mesure de savoir s'il y a modification des processus chimiques intervenant dans la réaction alcalis-granulats-additifs. Afin de s'assurer de la validité de l'hypothèse supposant que l'essai accéléré n'affecte en rien les résultats obtenus par Durand (1985, 1988), nous avons soumis les mêmes mélanges à l'essai ASTM C227 évaluant le potentiel de réactivité des granulats à une température de 38°C et à une humidité relative de 100%.

Pour ce faire, nous avons utilisé quatre granulats: un granulat ontarien

reconnu comme réactif et trois granulats québécois dont un seul n'est pas réactif. Tous ces granulats ont déjà été utilisés antérieurement dans des projets de maîtrise et de doctorat à l'Ecole Polytechnique de Montréal (Blanchette, 1989 et Durand, 1985, 1988). Conséquemment, le potentiel de réactivité de chaque granulat est déjà bien défini.

De plus, les additifs utilisés ainsi que le pourcentage de remplacement de ceux-ci au sein des mélanges de mortier sont les mêmes que ceux utilisés par Durand (1988) lors de son étude de doctorat. De cette façon, il a été possible de comparer les résultats obtenus dans la présente étude avec ceux des études précédentes. Nous avons utilisé deux type d'additifs connus avec des niveaux de remplacement variant de 5% à 70% du poids du ciment. Un troisième additif, le carbonate de lithium, relativement peu connu, a été utilisé avec des remplacements variant de 0,5% à 1,5%.

PROGRAMME D'ESSAIS

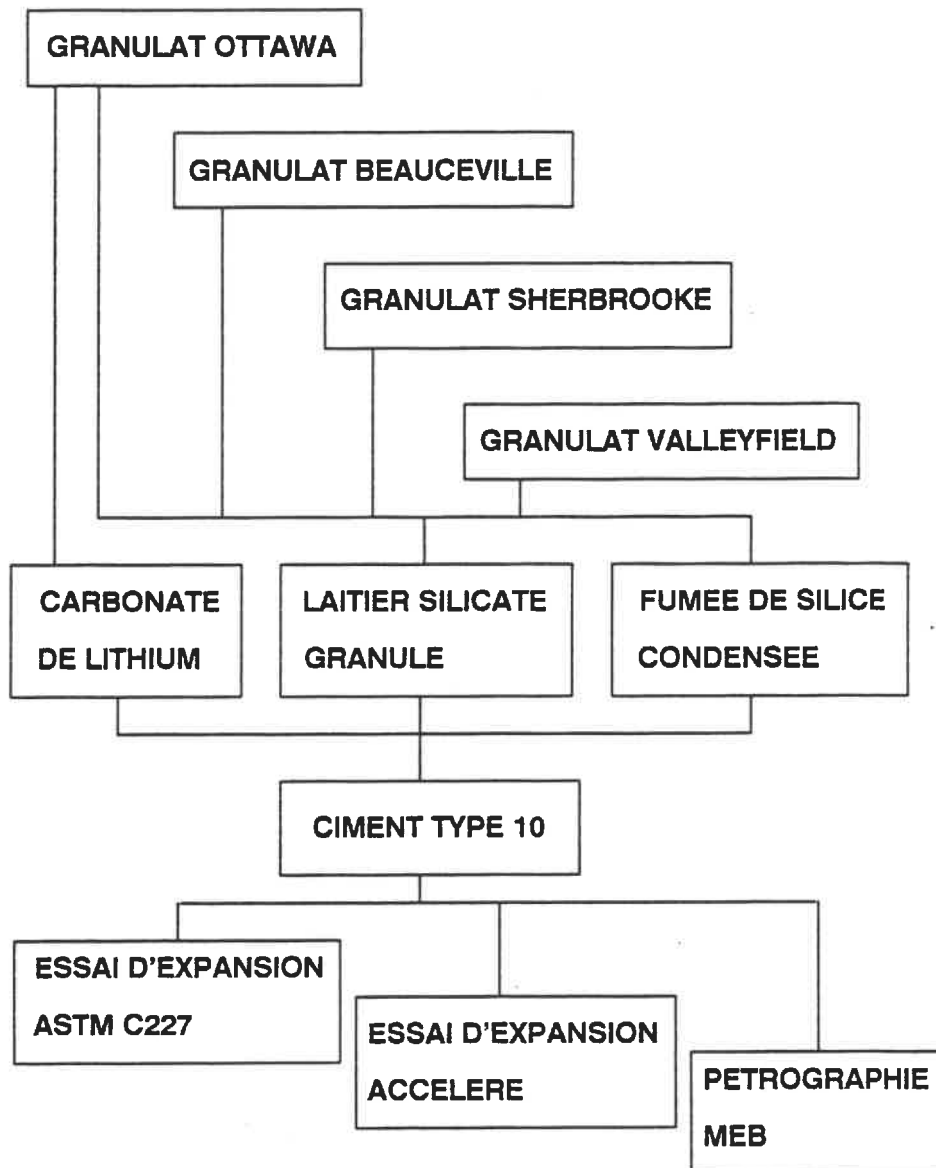


Fig. 1 : Programme d'essais

CHAPITRE 2

LE CIMENT PORTLAND

2.1 L'ORIGINE DU CIMENT PORTLAND

L'usage de matériaux cimentaires est très ancien. Déjà, les Romains et les Grecs fabriquaient des structures à base de chaux et de cendres volcaniques. Ils obtenaient leur chaux à partir de la calcination de la pierre calcaire (Metha, 1986).

Toutefois, le secret d'un bon mélange cimentaire fut perdu après l'ère Romaine. Avant de découvrir à nouveau un bon mélange, c'est à dire au 19^e siècle, on utilisait un ciment naturel qui n'avait pas de très bonnes qualités cimentaires (Neville, 1983).

Ce n'est qu'en 1824 que Joseph Aspin, un maçon de Leeds en Angleterre, découvrit par hasard la recette d'un bon produit cimentaire; le calcaire et l'argile

chauffés et broyés formaient un ciment hydraulique de bonne qualité.

2.2 LA FABRICATION DU CIMENT PORTLAND

La chaux et la silice sont les constituants primaires du ciment Portland. La source initiale de matériaux doit contenir suffisamment de calcium et de silice afin d'obtenir une bonne production.

Le processus de fabrication du ciment Portland consiste essentiellement au broyage de matériaux primaires constitués de calcaire et d'argile en proportions préalablement établies. Par la suite, après avoir obtenu un mélange homogène des matériaux, ceux-ci sont chauffés à des températures atteignant 1400°C à 1650°C. A ces températures, il y a fusion partielle des composés. Après un refroidissement rapide, le clinker obtenu est broyé finement et est pulvérisé en une poudre à laquelle on ajoute environ 5% de gypse. Le tout forme le ciment Portland commercialisé partout à travers le monde. La composition chimique et la proportion relative (ordre de grandeur) de chaque constituant du ciment Portland sont données ci-après (Neville, 1983):

Chaux	CaO.....63%
Silice	SiO₂.....22%
Alumine	Al₂O₃.....7%
Hématite	Fe₂O₃.....3%
Magnésite	MgO..... < 5%
Alcalis	K₂O, Na₂O..... < 0.6%(Faible teneur)
	 > 0.6%(Haute teneur)

La fusion partielle transforme les constituants primaires en quatre principaux composés que l'on retrouve dans le clinker d'un ciment normal de type 10 (ordre de grandeur d'après Neville, 1983 et Pigeon, 1986):

Silicate tricalcique	(C₃S)	3CaO SiO₂.....49%
Silicate dicalcique	(C₂S)	2CaO SiO₂.....25%
Aluminate tricalcique	(C₃A)	3CaO Al₂O₃.....11%
Alumino-ferrite tétracalcique	(C₄AF)	4CaO Al₂O₃ Fe₂O₃,..... 8%

De faibles quantités d'oxydes de magnésium et de calcium ainsi que des alcalis, du sodium et du potassium sont aussi présentes dans le ciment Portland.

2.3 LA CHIMIE DE L'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

La réaction entre l'eau et le ciment Portland est une réaction d'hydratation.

Pigeon (1986) cite à ce sujet :

" Lors de l'hydratation, il y a une réorganisation complète des composés du ciment. Il se forme des composés nouveaux, hydratés, qui sont insolubles dans l'eau et qui, avec le temps, forment une masse rigide."

Le ciment étant fait d'un mélange hétérogène de constituants, ceux-ci réagissent différemment avec l'eau. Ainsi, leur vitesse de réaction et leurs propriétés liantes ne sont pas identiques. Les graphiques des figures #2 et #3 montrent les courbes de vitesse d'hydratation et de prise des principaux constituants.

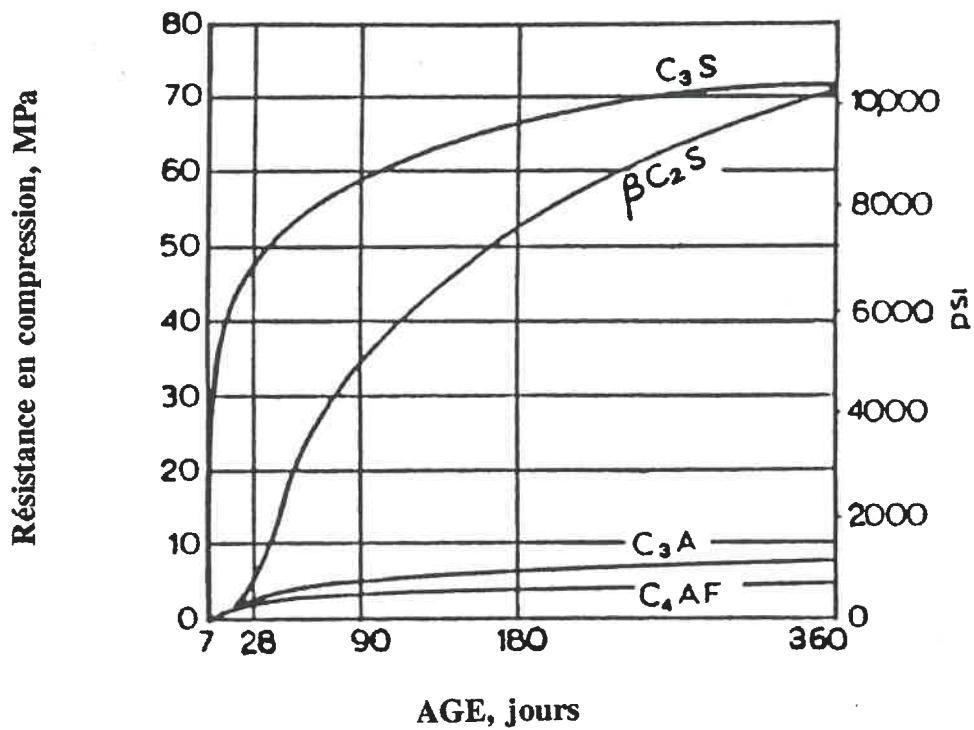
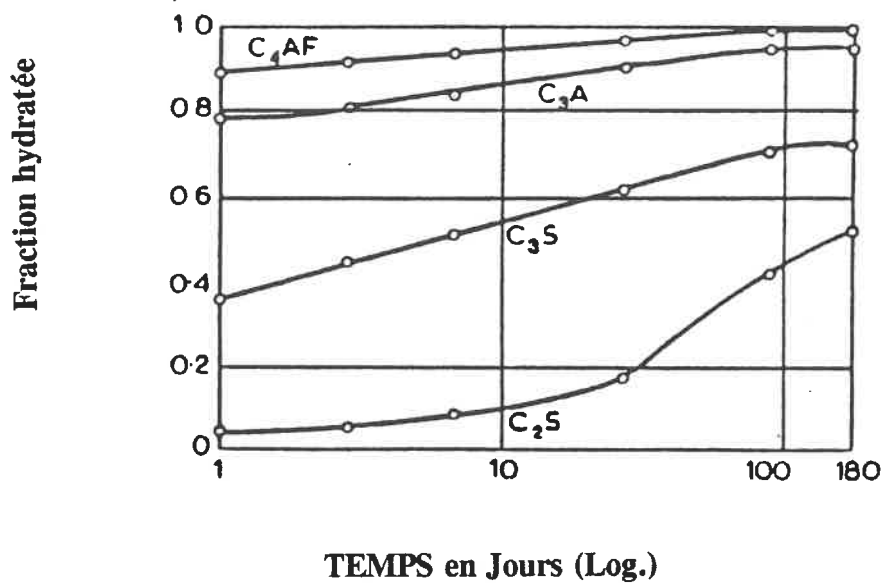
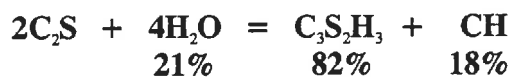
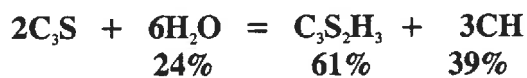


Fig. 2 et 3: Vitesse d'hydratation et vitesse de prise des principaux constituants du ciment Portland. (d'après Neville, 1983)

Les aluminates réagissent si rapidement qu'il devient nécessaire d'ajouter du gypse afin de ralentir la réaction avec l'eau. La perte de maléabilité et la prise rapide lors de la mise en place du béton sont en partie dues à l'hydratation des aluminates.

Constituant environ 75% en poids du ciment, les silicates jouent un rôle plus important lors du durcissement à long terme. Ils s'hydratent à une vitesse beaucoup moins élevée que les aluminates.

Les réactions stoechiométriques observées pendant l'hydratation des divers composants sont les suivantes:



On observe que le C_2S et le C_3S sont les principaux producteurs de C-S-H. Le C-S-H est le gel colloïdal de silicates de calcium hydratés qui produit le durcissement du ciment tandis que l'hydroxyde de calcium (CH) ne possède aucune propriété liante.

2.4 LE PROCESSUS D'HYDRATATION

La réaction entre l'eau de gâchage et la poudre de ciment est exothermique.

La courbe de température dégagée lors de l'hydratation du ciment caractérise les divers mécanismes intervenant pendant la réaction d'hydratation:

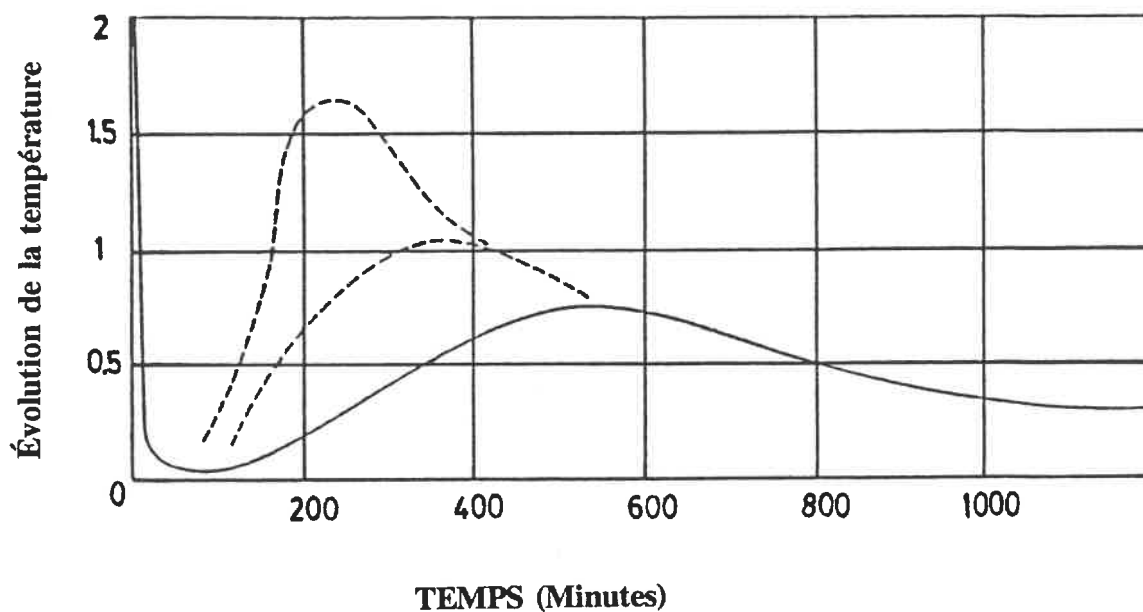


Fig. 4: Evolution de la température lors de l'hydratation du ciment Portland (Double et Hellawell, 1977)

Le graphique se partage en trois régions distinctes. La première est formée par un pic reflétant un très haut dégagement de température dans les premières minutes d'hydratation. Ce pic illustre l'hydratation rapide de la chaux libre et la dissolution des sulfates et aluminates (Metha, 1986). La deuxième région représente la période dite "dormante" où les grains de ciment commencent à s'hydrater. Une membrane semi-perméable commence à se former autour des particules de ciment. Pendant cette période, le dégagement de chaleur est très faible. A ce moment, un ressuage peut être observé en raison de l'effet de rapprochement des particules causé par la croissance de leur membrane.

Enfin, la troisième région correspond à une reprise de l'intensité de l'activité chimique. La membrane semi-perméable éclate sous l'effet de la pression osmotique permettant ainsi une recrudescence de l'hydratation des particules de ciment. Suite à l'éclatement de cette membrane, des "ponts" de fibrilles de gel de silicates de calcium hydratés (C-S-H) se forment entre les cristaux de ciment. La prise se fait par l'enchevêtrement des fibrilles de silicates de calcium et l'on observe sur la courbe de température un deuxième sommet. Metha (1986) indique que la formation de l'étringite s'effectue à ce moment-là tandis que Double et Hellawell (1977) préconisent la formation de la Portlandite (hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2) au même moment.

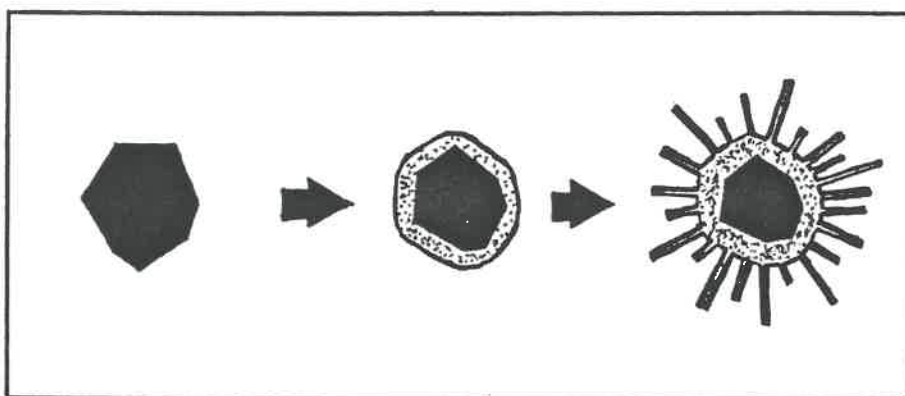


Fig. 5: Processus de la formation de la membrane semi-perméable et des fibrilles de C-S-H.
(d'après Double et Hellowell, 1977)

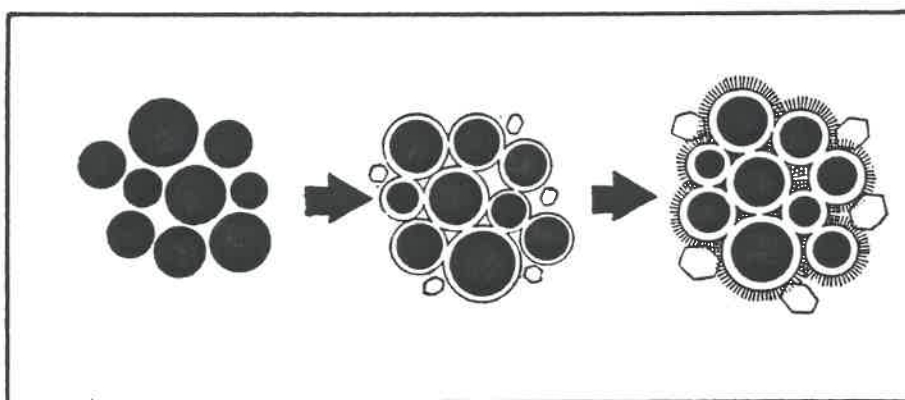


Fig. 6: Formation des liens entre les grains de ciment et formation de cristaux de portlandite.
(d'après Double et Hellowell, 1977)

Par la suite, la température diminue caractérisant ainsi une diminution de l'activité chimique. L'hydratation se prolongera tant que l'eau continuera à dissoudre le ciment. Graduellement, les produits de l'hydratation rempliront les espaces entre les grains de ciment. La pâte de ciment deviendra plus dense et plus résistante.

2.5 LA CONSTITUTION DE LA PÂTE DURCIE

Lorsque l'hydratation est terminée, la pâte de ciment hydratée est principalement constituée d'hydrates, de grains de ciment non-hydratés, d'espaces capillaires généralement remplis d'eau et de bulles d'air. Ce sont les hydrates qui donnent à la pâte sa rigidité. La nature de ces hydrates est variée: on retrouve les silicates de calcium hydratés (C-S-H) représentant plus de 50% du total des hydrates, les aluminates hydratés, la chaux hydratée (Ca(OH)_2), l'eau adsorbée et les impuretés (Pigeon, 1986).

La composition des silicates de calcium hydratés ne semble pas fixe selon Durand (1988):

..."nous ne devons donc pas considérer les silicates de calcium hydratés comme des phases pures de composition fixe, mais plutôt comme des phases impures principalement composées de calcium, de silicium et d'eau pouvant contenir des quantités non négligeables d'alcalis, de soufre, d'aluminium, de magnésium et de fer."

Selon Diamond (1976), on retrouve quatre types morphologiques du gel de C-S-H: les particules fibreuses, le réseau réticulaire, les grains aplatis irréguliers et le produit interne formé au sein des particules de ciment. La porosité de l'ensemble des hydrates est estimée à 28% et est principalement constituée de pores d'environ 15 à 20 Å. La surface spécifique du gel est de l'ordre de 200 000 m²/Kg.

CHAPITRE 3

LES RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS

3.1 HISTORIQUE

De nos jours, il est établi que des réactions chimiques se produisent entre les granulats et la pâte de ciment durcie. Mais, ce n'est qu'en 1935 que l'américain Holden a réalisé que les granulats ne devaient pas être considérés inertes comme auparavant. Ainsi, en 1940, Stanton observa le premier les signes d'une réaction dans un barrage de Californie. Au Québec, le premier cas de réaction des granulats avec la pâte de ciment au sein du béton fut étudié en 1965 sur des grès et des phyllades de la Gaspésie. Mais déjà en 1957, E. Chauret (Chauret, 1958), un ingénieur au service de la ville de Montréal, indiqua la possibilité d'une réaction entre un granulat calcaire de la région de Montréal et la pâte de ciment durcie. De nos jours, plusieurs types de granulats sont considérés néfastes comme granulats à béton (Bérard, 1982 et 1985, Durand, 1969, Durand et Bérard, 1974, Houde, 1986, Durand, 1985 et 1988, Bérubé et Fournier, 1985, 1986 et 1987,

Blanchette, 1989).

3.2 LES CONDITIONS ESSENTIELLES AUX RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS

Avant d'élaborer sur les types et sur les mécanismes des réactions alcalis-granulats, il est important de prendre conscience qu'indépendamment du type de granulats utilisés, il est nécessaire de réunir les trois conditions suivantes pour qu'une réaction du type alcalis-granulats se manifeste (Bérubé et al., 1989 et Dolar-Mantuani, 1983):

1- Le granulats doit être réactif: Comme nous le verrons plus loin, pour être réactif un granulats doit contenir un pourcentage non négligeable de composantes réactives. Le degré de réactivité, la quantité et la granulométrie du granulats réactif influenceront l'intensité de la réaction (Huayon Xu, 1987).

2- La concentration en alcalis doit être élevée dans la solution interstitielle du béton: La présence d'alcalis favorise un pH très élevé, dit hyperbasique qui est directement relié au dosage (rapport e/c) du mélange. Le dosage influence aussi la perméabilité, la porosité et la résistance du béton. La qualité des constituants, la solubilité et le contenu des alcalis du ciment joueront un rôle

important dans le processus de la réaction (Smith, 1986, Skaly et Klemm, 1981).
A ce sujet, Krell (1987) mentionne que la détérioration du béton due à la réaction alcalis-granulats est moindre si le rapport e/c est faible.

3- Les conditions d'humidité doivent être élevées: Une humidité d'au moins 80% à 85% est requise. Les conditions climatiques interviennent dans le processus de la réaction selon leur degré de sévérité: l'intensité des cycles mouillage-séchage (pluie, vent, ensoleillement), l'enfouissement dans le sol, l'immersion sous l'eau, les marées, la variation des températures, etc.

3.3 LES TYPES DE RÉACTION ALCALIS-GRANULATS

La liste des roches reconnues réactives ne cesse de s'allonger^{er}. Dolar-Mantuani (1983) a recensé près d'une quarantaine de roches qui ont été reconnues réactives à plus ou moins long terme. Toutefois, ce sont les minéraux de dolomite et/ou de silice contenus dans ces roches qui sont réactifs. On reconnaît deux familles de réaction: le type "alcalis-carbonates" où la dolomite est le minéral réactif et le type "alcalis-silice" et/ou "alcalis-silicates" où c'est plutôt la silice qui est la source de réactivité. Quelle que soit le type de réaction, la taille des particules réactives, leur microstructure et leur surface spécifique auront un rôle à jouer sur la vitesse de la réaction.

3.3.1 LES MÉCANISMES DE LA RÉACTION ALCALIS-SILICE

Après la prise du ciment, les granulats se retrouvent dans un milieu confiné, alcalin et fortement basique. Certains granulats se révèlent instables en raison des réactions chimiques se produisant avec les alcalis présents dans le liquide interstitiel.

La silice faiblement cristallisée tels l'opale, le chert, certains verres volcaniques et autres, (Dolar-Mantuani, 1983) est dissoute en grande quantité lorsque le pH atteint des valeurs de 12,0 et plus (Ming-shu, 1980a) tel qu'illustré à la figure suivante.

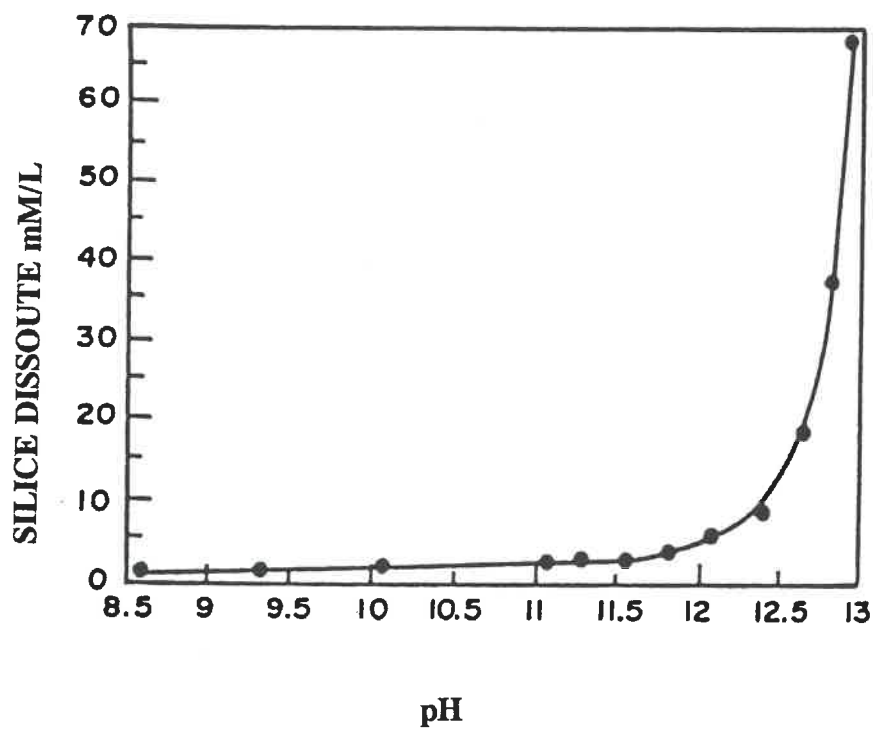
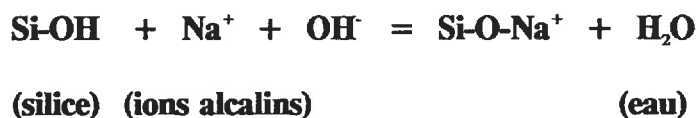


Fig. 7: Courbe de la solubilité de la silice
(d'après Ming-shu, 1980a).

Dent-Glasser et Kataoka (1981a) proposent un modèle du mécanisme de réaction entre la silice et la solution interstitielle: la silice peu cristallisée possède un arrangement moléculaire peu "structuré" facilitant ainsi l'infiltration des groupes hydroxyles (OH^-) associés aux alcalis de la solution interstitielle. Les groupes silanols acides (Si-OH) de la silice réagissent avec les hydroxyles selon l'équation:



alcalins dans la solution interstitielle du béton. Cependant, le contenu en ions hydroxydes est fortement influencé par la contenu en ions alcalins (Diamond, 1975).

Les figures suivantes schématisent le processus.

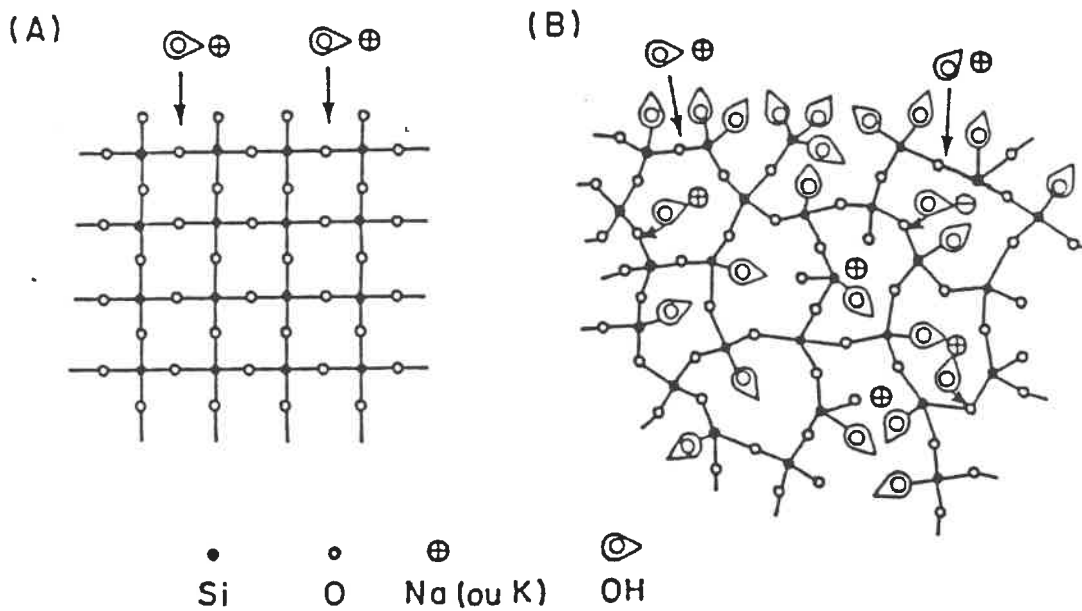


Fig. 8: Différence entre une silice bien cristallisée (A) et une silice faiblement cristallisée (B). (d'après Dent-Glasser et Kataoka, 1981a)

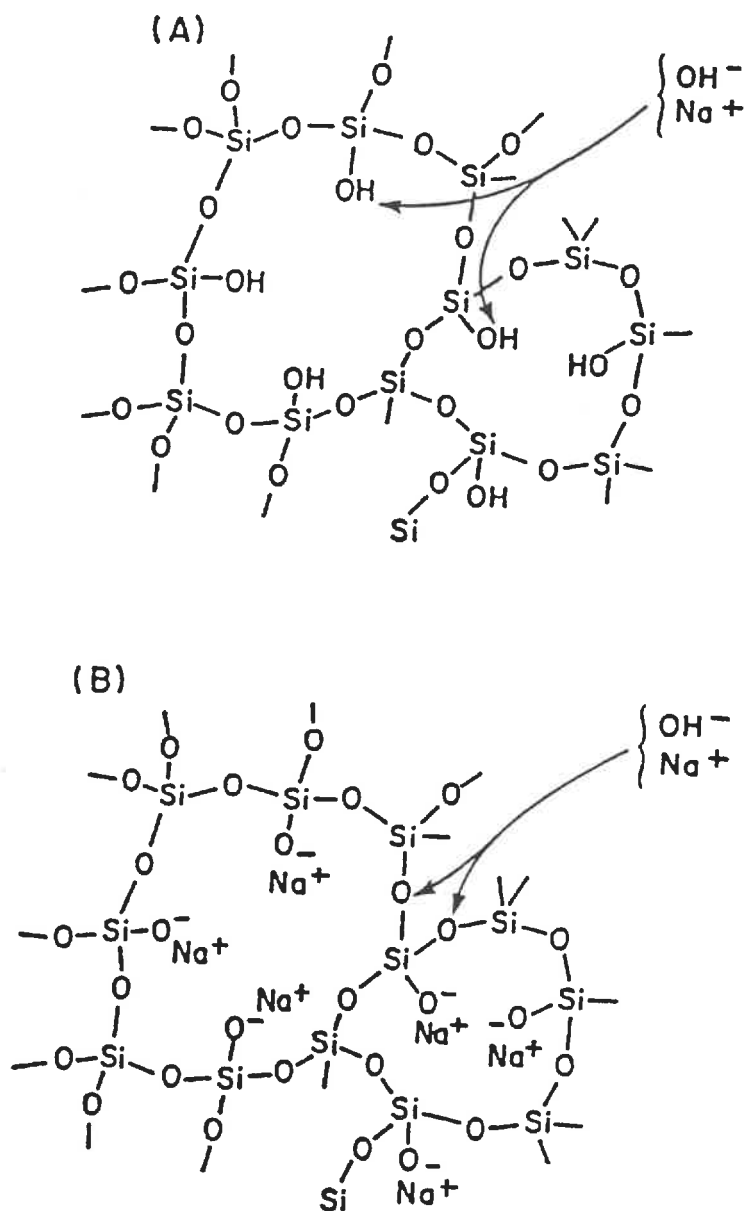


Fig. 9: Attaque d'une silice peu cristallisée par des hydroxydes d'alcalis.
(d'après Dent-Glasser et Kataoka, 1981a)

Deux théories semblables sont utilisées pour expliquer le phénomène de l'expansion du gel calco-alcalin-siliceux formé à la suite de la réaction: la théorie d'absorption et la théorie de la pression osmotique (Dolar-Mantuani, 1983 et Diamond, 1975).

Selon la première théorie (Vivian, 1951), les minéraux siliceux produisent un gel silico-alcalin relativement "sec" et encore rigide. Celui-ci gonfle à la suite d'imbibition de l'eau libre générant ainsi des pressions hydrostatiques au sein de la structure.

La théorie suivante, celle de la pression osmotique décrite pour la première fois par Hansen en 1944, suggère plutôt que la pâte de ciment entourant les granulats agit comme membrane semi-perméable: les ions hydroxyles alcalins et l'eau peuvent être diffusés dans le granulat pendant que les ions siliceux sont "emprisonnés" à l'intérieur du granulat. L'action d'osmose développe des fissurations ainsi qu'une augmentation de volume aux abords du granulat et de la pâte de ciment.

Une explication plus récente, similaire au modèle de la membrane semi-perméable, stipule qu'au début de la réaction une couche de silicates d'alcalis et de calcium se développe à la surface de la silice réactive. Cette couche est

perméable aux alcalis mais peu perméable aux cations de calcium (Diamond, 1975). Selon Per Bredsdorff et al. (1960), Power et Steinour (1955), la fluidité des gels résultant des réactions alcalines est fonction de leur teneur en calcium. L'épanchement des gels de silice est inversement proportionnel à leur teneur en calcium. Ils rapportent que les gels de silice purs sont à épanchement illimité: ces gels absorbent beaucoup d'eau, sont gonflants et sont donc délétères pour les bétons. Par contre, les gels riches en calcium sont à épanchement limité, donc inoffensifs.

Le type de gel serait fonction du rapport calcium/alcalis qui, lui, serait fonction de la teneur en alcalis de la pâte de ciment (Abet, 1985).

Par contre, Ming shu (1980a) indique que l'expansion se fait avant que le produit de la réaction devienne fluide. Il propose plutôt que l'expansion soit contrôlée par le nombre de particules de granulats réactifs par unité de volume de mortier, par la quantité d'alcalis pour la surface unitaire de granulats réactifs, par la force d'expansion générée par chaque particule en réaction alcali-silice et par la tension de la pâte de ciment.

La taille des granulats expansifs affecterait le taux d'expansion (Diamond et Thaulow, 1974), ainsi que la température (Stanton, 1943). Bérubé et al. (1989)

et Deloye (1983) stipulent d'après leurs observations de structures que la réaction se manifeste seulement dans les zones où les contraintes en compression ne sont pas trop élevées. Ainsi, rares sont les observations de phénomènes de réaction alcalis-granulats à la base des structures de béton.

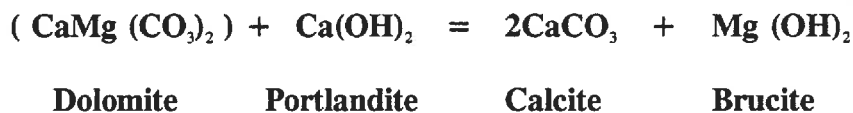
3.3.2 LES MÉCANISMES DE LA RÉACTION ALCALIS-CARBONATES

Un autre type de réaction délétère avec les alcalis affecte les granulats dolomitiques. Les effets d'expansion sont de même nature que les autres types de réaction: fissurations, expansion et détérioration des liens entre les granulats et la pâte de ciment hydratée.

Plusieurs études ont démontrées qu'il s'agissait d'une réaction de "dé-dolomitisation" sans toutefois bien l'expliquer (Neville, 1983). Il semble que l'argile contenue dans la dolomie soit associée à la dé-dolomitisation. Il a aussi été reconnu que les cristaux de dolomite et de calcite contenus dans les roches réactives sont de très petite taille.

Une première hypothèse suggère qu'il y a expansion lorsque les minéraux argileux absorbent de l'eau. Ces minéraux sont devenus accessibles par le mécanisme de la dé-dolomitisation: la solution alcaline détruit les cristaux de

dolomite qui libèrent les minéraux argileux emprisonnés dans la dolomie. Les minéraux argileux absorbent directement l'eau présente et gonflent, ou, adsorbent le sodium pour former un matériel hygroscopique qui imbibe l'eau (Neville, 1983 et Deloye, 1983):



Une autre hypothèse veut plutôt que l'argile accroît la réactivité des agrégats de dolomie avec les silicates de calcium hydratés. Il y a, ainsi, production d'un gel de silice, de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$, et d'un carbonate de calcium avec une augmentation de volume de 4%.

Ming-Shu et al. (1987) proposent plutôt que la réaction est initiée par la migration des ions alcalins, des ions OH^- et de l'eau à travers les minéraux argileux. Ceux-ci forment des "canaux" entre les cristaux de calcite et de dolomite contenus dans la roche. Les ions alcalins et OH^- réagissent avec les cristaux de dolomite pour former la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et du K_2CO_3 ou du Na_2CO_3 . Le volume occupé par la dolomite est moindre que celui nécessaire à la cristallisation du K_2CO_3 et du Na_2CO_3 , ce qui explique l'expansion observée au sein du béton.

Une distinction entre la réaction alcalis-silice et alcalis-carbonates se fait par la façon dont les alcalis sont générés. La réaction alcalis-carbonates est très sensible à la teneur en alcalis des additifs minéraux (Durand, 1985). C'est probablement pour cette raison que certains additifs minéraux n'ont pas les effets escomptés sur le contrôle de la réaction alcalis-carbonates (Grattan-Bellew, 1981).

CHAPITRE 4

LES AJOUTS MINÉRAUX

4.1 INTRODUCTION

Plusieurs procédures ont été suggérées pour diminuer ou pour éliminer les réactivités alcalis-granulats dont, l'utilisation d'un ciment à faible teneur en alcalis, l'utilisation d'un granulats non-réactif ou l'utilisation d'additifs de nature pouzzolanique.

Dans l'ouest de l'Amérique du Nord, la nature de la matière première le permettant, le ciment à faible teneur en alcalis est couramment fabriqué par les cimenteries. Toutefois, Stark et Bhatti (1985), ont cité plusieurs cas de réactivité alcalis-granulats même si le ciment utilisé avait une faible teneur en alcalis.

L'emploi de granulats non-réactifs n'est pas toujours aisé. Pour des raisons économiques, soit de transport, soit de disponibilité, il arrive parfois qu'on soit

obligé d'utiliser un granulat reconnu réactif.

Heureusement, l'apport des additifs minéraux est salubre au domaine du béton. Ajoutés au mélange de béton, les additifs apportent certaines modifications chimiques et physiques au sein du béton. Le présent chapitre sera consacré aux divers types d'additifs couramment utilisés et aux conséquences de leur utilisation sur la réaction alcalis-granulats.

4.2 HISTORIQUE

Il y a deux mille ans, les Romains utilisaient un mélange de chaux et de cendres volcaniques du Vésuve qui avaient la propriété de durcir sous l'eau.

Au XX^e siècle, la reconstruction des villes européennes détruites lors de la deuxième guerre mondiale entraîna une pénurie de ciment. L'utilisation de cendres volantes et de laitiers de haut fourneau permis d'augmenter la production de liant hydraulique sans avoir à investir dans la construction de nouvelles cimenteries (Pinsonneault et Aïtcin, 1983).

4.3 ASPECT ÉCONOMIQUE

L'utilisation des ajouts minéraux dans le béton permet de diminuer son contenu énergétique donc, de diminuer les coûts de fabrication.

De même, l'utilisation des ajouts minéraux peut aussi résoudre des problèmes d'environnement en valorisant des résidus industriels générés par d'autres industries (Metha, 1986).

Enfin, la présence des ajouts minéraux au sein du béton permet d'améliorer ses propriétés physiques et chimiques telles l'augmentation de la résistance en compression et une meilleure durabilité face aux environnements agressifs.

4.4 LES TYPES D'AJOUTS MINÉRAUX

Les ajouts se divisent en deux familles: les matériaux naturels qui sont de nature volcanique, minérale ou organique et les sous-produits industriels.

Le processus de fabrication des ajouts naturels nécessite en général un concassage, un broyage et un tamisage. Une activation thermique est quelques fois nécessaire. Ces matériaux sont des terres à diatomées ou des dérivés d'éruptions

volcaniques.

Les sous-produits industriels sont des rejets de diverses industries. En général, les résidus ne nécessitent pas de manipulation avant leur utilisation dans le mélange de béton. Toutefois, les laitiers de haut fourneau ont besoin d'un concassage avant leur addition au béton ainsi qu'un broyage et un tamisage.

Les principaux additifs provenant des industries sont: les cendres volantes produites lors de la combustion du charbon, les fumées de silice condensées produites lors d'opérations de métallurgie et les laitiers silicatés granulés qui sont dérivés d'industries de métaux ferreux et non-ferreux.

Les types d'ajouts utilisés dans la présente étude sont essentiellement des sous-produits industriels. Pour cette raison, seul ces types d'ajouts "artificiels" seront traités en détails. Outre cette considération, notons que dans l'est de l'Amérique du Nord on ne dispose que de terres à diatomées du Nouveau-Brunswick comme pouzzolanes naturelles.

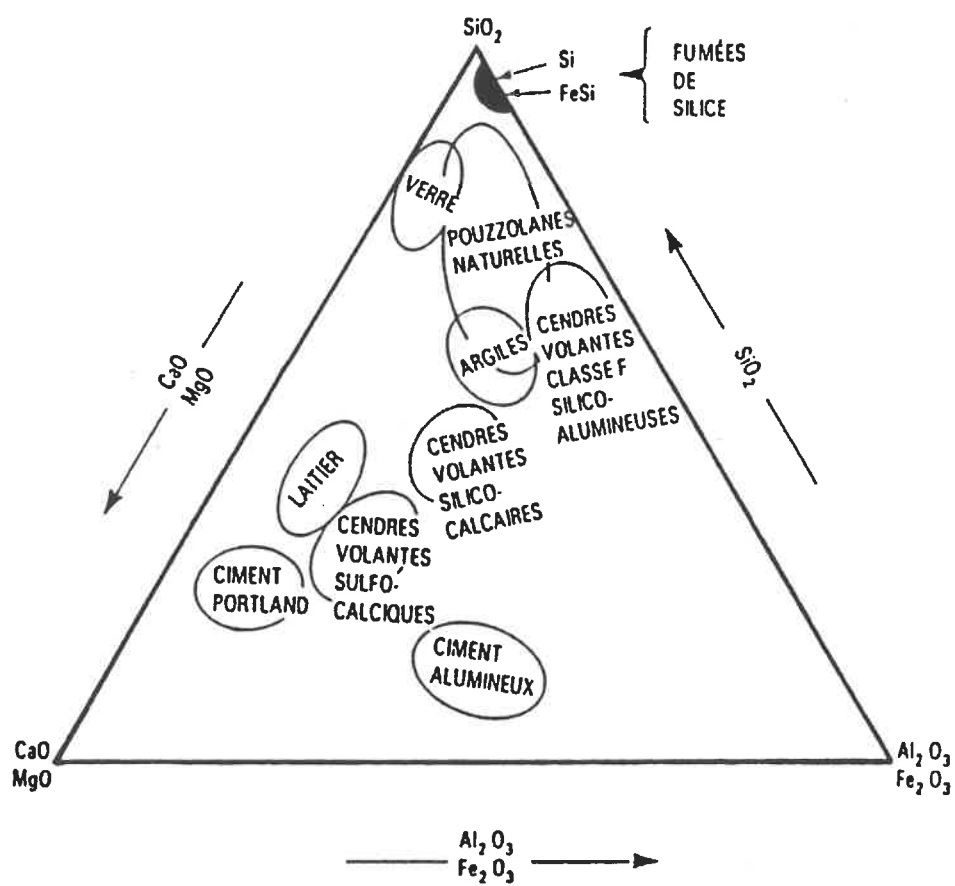


Fig. 10: Diagramme ternaire des ajouts minéraux.
(d'après Aïtcin, 1988)

4.4-1 LES CENDRES VOLANTES

Les cendres volantes sont produites lors de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. La récupération se fait à l'aide de filtres électrostatiques. Les cendres volantes proviennent des impuretés contenues dans le combustible. Il existe donc une très grande variété de cendres volantes. Leurs propriétés cimentaires dépendent de divers paramètres tels l'origine du charbon utilisé, le degré de pulvérisation du charbon, l'âge de la centrale, les conditions d'opération ainsi que le processus de récupération des cendres (Aitcin, 1988).

La norme ASTM C618 regroupe les cendres volantes en deux classes, "F" et "C", d'après leur composition chimique. La classe "F" est caractérisée par une teneur en oxyde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ supérieure à 70% et une faible teneur (10%) en CaO. Les cendres de cette classe n'ont pas de pouvoir liant mais ont un potentiel pouzzolanique. La classe "C" regroupe des cendres volantes riches en chaux ($\text{CaO} > 10\%$) et ayant une teneur en $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ supérieure à 50%. Ces cendres ont une action pouzzolanique et sont parfois hydrauliques.

Les cendres volantes sont de la taille des grains de ciment et se présentent sous forme de particules sphériques pleines ou creuses de 0,5 à 200 microns. La surface spécifique de la classe "F" est située entre 270 et 425 m^2/kg tandis que celle

de la classe "C" varie de 550 à 800 m²/kg.

Pour un béton ordinaire, la substitution par des cendres volantes peut atteindre 30%. Les cendres de classe "C" peuvent remplacer une quantité équivalente de ciment tandis que les cendres de classe "F" ne peuvent remplacer qu'une quantité moindre sans affecter la résistance du béton. On retrouve les cendres de classe "F" à l'est de l'Amérique du Nord tandis que celles de la classe "C" se retrouvent principalement à l'ouest.

L'utilisation de cendres volantes améliore la maniabilité du béton frais. De plus, l'imperméabilité et la durabilité du béton durci s'en trouve améliorées. La chaleur d'hydratation dégagée est diminuée par l'addition de cendres volantes. La présence de celles-ci contribue à augmenter la résistance aux sulfates ainsi qu'à réduire les phénomènes d'expansion reliés aux réactions alcalis-granulats. Lors de la mise en place, on note toutefois des problèmes à contrôler le pourcentage de l'air entraîné chimiquement (Malhotra, 1983).

4.4-2 LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie de la fonte. La composition du laitier est très voisine de celle du ciment Portland.

Voici la définition proposée par l'ACNOR (1986):

" Un matériau provenant de la solidification d'un produit non-métallique en fusion et qui est composé essentiellement de silicates et alumino-silicates de calcium et d'autres éléments basiques qui se forment simultanément avec le fer dans un haut-fourneau."

Le laitier est constitué par le liquide qui surnage la fonte en fusion dans le haut fourneau. Lorsque ce liquide est refroidi très rapidement dans l'eau ou dans un courant d'air frais on obtient des granules vitreuses de laitier. Il faut moulinier très finement ces granules pour qu'elles gagnent un certain pouvoir liant.

La température du laitier au moment de sa trempe et la vitesse de trempe influencent grandement le pouvoir liant des laitiers car ce sont surtout ces deux facteurs qui déterminent le contenu vitreux du laitier donc, son potentiel réactif (Pinsonneault et Aïtcin, 1983).

En général, les laitiers produits avec un haut fourneau fonctionnant en marche chaude et refroidis très rapidement sont de couleur clair, très friables, peu cristallisés (de texture vitreuse) et très réactifs. Durant la trempe, ils se fractionnent sous forme de granules d'où le nom de laitiers silicatés granulés. Par contre, si la cristallisation est lente, le laitier peut cristalliser et peut être utilisé comme granulats de fondations routières. Les meilleurs laitiers utilisés par les cimenteries ont un indice de basicité (chaux/silice) variant entre 1.1 et 1.4.

Une fois broyées, les particules sont anguleuses et possèdent des surfaces rugueuses. La finesse de mouture Blaine se situe entre 390 et 500 m²/kg (Metha, 1986).

Au Canada, deux millions de tonnes de laitier sont produites annuellement mais seulement deux cent mille sont utilisées par les cimenteries (Metha, 1983).

On peut utiliser jusqu'à 50% de laitiers en remplacement du ciment dans un béton ordinaire et, jusqu'à 85% pour des constructions marines.

De la même façon que les cendres volantes, l'utilisation de laitiers permet de diminuer le coût de fabrication du mètre cube de béton, de diminuer la chaleur d'hydratation (donc de réduire les risques de retrait) et d'augmenter la plasticité du béton frais. De plus, la durabilité face aux sulfates et à l'eau de mer est améliorée par la plus grande densité du C-S-H formé par le laitier et par une plus faible teneur en chaux. En fixant une certaine quantité des alcalis dans les produits hydratés les laitiers permettent de contrôler les réactions alcalis-granulats (Aïtcin, 1988 et Durand, 1988). De plus, la faible teneur en chaux permet au béton d'être plus résistant à la carbonatation.

On retrouve dans le ciment Portland deux des principaux activants du laitier:

le gypse et la chaux. Cette dernière est libérée par l'hydratation des silicates du clinker qui favorisent la transformation du laitier en C-S-H. Le gel de C-S-H provenant de l'hydratation du laitier est différent de celui formé lors de l'hydratation du ciment Portland; il serait moins bien cristallisé et beaucoup plus dense.

Lors de l'hydratation du laitier, le rapport C/S dans le C-S-H formé est faible (1,2 @ 1,3), alors que ce rapport est de 1,6 @ 1,8 dans le C-S-H provenant de l'hydratation du clinker.

4.4-3 LES FUMÉES DE SILICE CONDENSÉES

Les fumées de silice sont des microsphères vitreuses 100 fois plus fines que les grains de ciment et ayant une surface spécifique de l'ordre de 20 000 @ 30 000 m²/kg. Les fumées de silice sont récupérées par des filtres électrostatiques à la sortie des gaz d'échappement des fours à arc électrique utilisés dans la fabrication du silicium ou du ferrosilicium. Il y a formation d'un sub-oxyde gazeux de SiO lors de la réduction du quartz par le charbon. Lorsque les vapeurs de SiO entrent en contact avec l'air elles s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice vitreuse, SiO₂ (Metha, 1983).

Dans cette industrie, l'utilisation de matière première très pure favorise une stabilité chimique des fumées de silice qui se montrent très supérieures aux autres additifs minéraux (Malhotra, 1983).

La teneur en silice est très élevée et se situe entre 85% et 93% tandis que la teneur en carbone est très faible, soit moins de 5%.

Par leur très grande finesse, leur forte teneur en silice et leur structure interne vitreuse, les fumées de silice ont la capacité de fixer très rapidement la chaux libérée lors du processus d'hydratation des silicates de chaux du ciment (Pinsonneault et Aïtcin, 1983). Le gel de C-S-H formé est très compact et est très semblable à celui formé par les cendres volantes.

L'addition de fumées de silice condensées dans les bétons permet une forte diminution de la perméabilité du béton. On peut utiliser des FSC dans les bétons ordinaires jusqu'à concurrence de 10 % de remplacement du poids du ciment. Il est possible de remplacer jusqu'à 20% en poids de ciment dans les mélanges mais l'utilisation d'un superplastifiant devient nécessaire, la maléabilité du béton étant très diminuée. La présence des FSC dans les bétons améliore les propriétés mécaniques du béton. On observe une augmentation de la résistance en compression, une diminution de la porosité et de la perméabilité. Les FSC

modifient aussi le comportement chimique des bétons en augmentant la résistance aux sulfates et en diminuant les conséquences des réactions alcalis-granulats. Les fumées de silice condensées piègeraient les alcalis dans le gel de C-S-H, si bien, qu'il n'y aurait plus d'alcalis pour réagir avec les phases réactives des granulats (Bhatty, 1985).

En Islande, on ajoute environ 7% de fumée de silice condensée à tout ciment commercialisé en vue de réduire les réactions alcalis-granulats. Déjà, en 1976, les fumées de silice étaient utilisées en Scandinavie. A Montréal, ce n'est qu'en 1987 que les fumées de silice ont été commercialisées. Toutefois, l'ACNOR permettait déjà l'utilisation de celles-ci sans aucune restriction en 1981.

Une cure adéquate de mûrissement doit être faite pour éviter tout problème causé par les fissurations de retrait plastique du béton dont le nombre augmente avec l'utilisation des FSC (Malhotra, 1983).

4.5 LES EFFETS DES AJOUTS DANS LE PROCESSUS DE LA RÉACTION ALCALIS-GRANULATS

Selon Durand (1988), trois hypothèses sont retenues concernant l'effet des ajouts minéraux sur la réactivité alcalis-granulats:

- L'effet de dilution;
- L'action pouzzolanique: emprisonnement des alcalis dans le C-S-H, modification du rapport C/S et de la morphologie du C-S-H et la fixation de la chaux Ca(OH)_2 libérée lors de l'hydratation du ciment pour former des silicates de chaux secondaires;
- La perméabilité du béton versus la mobilité des ions.

La dilution: Lorsqu'on ajoute un additif en remplacement du ciment on réduit le pourcentage d'alcalis au sein du béton si l'additif a une faible teneur en alcalis, ce qui est généralement le cas (Metha, 1983, Tuthill, 1978, Farbiarz, Carasquillo et Snow, 1987).

L'action pouzzolanique: Les ajouts à action pouzzolanique forment un C-S-H lors de leur hydratation avec la portlandite. De plus, nous savons que le C-S-H a la propriété d'emprisonner une certaine quantité d'alcalis. Donc, en général, l'utilisation d'un additif minéral créera plus de C-S-H qui pourra de son côté emprisonner plus d'alcalis. Il y aura, ainsi, moins d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats (Bhatty, 1985).

Généralement, le contenu en SiO_2 des ajouts est toujours élevé. La formation de silicates de calcium hydratés produits par les ajouts présente un rapport C/S moindre qu'un mélange sans ajout. Les C-S-H ainsi formés sont susceptibles d'incorporer plus d'alcalis au sein de leur structure (Glasser, 1987 et Bhatty, 1985).

Ming-shu et al. (1980b) stipulent que l'utilisation d'ajouts minéraux "acides" abaisse la basicité totale du béton. Le milieu environnant du granulat deviendrait moins agressif. Plus "l'acidité" des ajouts est importante, plus leur effet sur la réaction alcalis-silice est considérable. Pour contrôler la réaction alcalis-granulats par l'addition d'ajouts minéraux, il faut que le rapport C/S du ciment et des additifs soit d'environ 1,5 ou moins.

Le gel formé à la suite d'une réaction alcalis-silice est constitué d'alcalis et

de silice (Ming-shu et al., 1980a). La présence de la portlandite Ca(OH)_2 formée lors de l'hydratation pourrait régénérer les alcalis au sein du béton. Le calcium plus mobile pourrait remplacer les alcalis dans le gel siliceux et ainsi rendre disponible à nouveau les alcalis. Durand et Bérard (1987) ont analysé des gels de silice provenant de plusieurs échantillons contenant des granulats réactifs et ont démontré que le gel est toujours calco-silico-alcalin, ce qui pourrait confirmer le rôle du calcium dans les réactions alcalis- granulats (Durand, 1988).

En utilisant des ajouts minéraux dans les mélanges de béton, ceux-ci se combinent à la portlandite entraînant ainsi une diminution de calcium, d'où une diminution de la régénération d'alcalis. Mais, encore selon Ming-shu et al. (1980b), si la quantité d'additifs n'est pas suffisante pour réagir avec toute la portlandite, il y aura régénérescence d'alcalis mais sur un laps de temps plus long. Selon Chatterji (1978), les réactions alcalis-granulats sont absentes s'il n'y a pas de portlandite Ca(OH)_2 dans le béton. De plus, Durand (1988) a obtenu de bonnes corrélations entre les réductions d'expansion avec l'utilisation d'additifs et la réduction des teneurs en Ca(OH)_2 . A partir de ses observations, il est tenté de conclure

"... que la teneur en Ca(OH)_2 des bétons contenant des granulats réactifs aux alcalis est un facteur déterminant dans l'explication de l'efficacité ou du rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats."

La perméabilité: Bakker (1981) a étudié le taux de diffusion des ions alcalins. Les résultats montrent que le taux de diffusion des ions alcalins pour un mortier âgé de trois jours, sans additif, est cinq fois plus rapide que pour un mortier avec laitier et quinze fois plus rapide lorsqu'ils sont âgés de quatorze jours.

Pour observer une expansion causée par une réaction du type alcalis-granulats, il faut des alcalis mais aussi de l'eau, d'où l'importance de la perméabilité des mortiers et/ou des bétons. Bakker (1981) démontre aussi dans son étude qu'un mortier avec laitier est beaucoup moins perméable à l'eau qu'un mortier ordinaire. Donc, la diffusion des ions alcalins serait très diminuée à l'intérieur d'un mortier avec additifs. Tenoutasse et Marion (1987) sont du même avis.

D'un autre côté, Lenzner (1981) mentionne à ce sujet que les effets des produits de réaction sont moindres si la pression se répartit dans les pores du béton. Les pressions hydrostatiques ne seraient pas transmises à la structure du béton. Plus la porosité sera grande, moins les effets d'expansion seront transmis à la structure.

Durand (1988) soulève un autre point important concernant l'effet des ajouts

Durand (1988) soulève un autre point important concernant l'effet des ajouts minéraux sur la porosité c'est-à-dire la zone de transition pâte-granulat. Cette zone possède des caractéristiques différentes de la pâte de ciment hydratée normale. Il stipule à ce sujet:

" Il est possible que l'hypothèse de la réduction de la mobilité des ions de la solution interstitielle trouve toute son importance au niveau de la perméabilité de la zone de transition pâte-granulat et non pas au niveau de la perméabilité du béton dans son ensemble."

Rappelons que la cure de l'essai accéléré nécessite une immersion totale des échantillons dans une solution de soude. L'influence des additifs sur la perméabilité des mortiers prend donc une très grande importance.

CHAPITRE 5

MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA RÉACTIVITÉ ALCALIS-GRANULATS

5.1 REVUE DES MÉTHODES NORMALISÉES

Il existe présentement plusieurs essais qui tentent d'évaluer le potentiel de réactivité des granulats. Nous verrons dans ce sous-chapitre les essais normalisés couramment utilisés. Les caractéristiques principales propres à chacun des essais seront décrites et commentées brièvement.

5.1.1 L'EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE (ASTM C295)

Cet essai doit toujours être exécuté par un géologue-pétrographe sensibilisé aux phénomènes des réactions alcalis-granulats. Le géologue-pétrographe détermine si des phases réactives sont présentes au sein de l'échantillon à l'aide d'examens mégascopique et microscopique. Si tel est le cas ou si un doute persiste, des méthodes d'identification plus poussées peuvent être utilisées telles, la

diffraction X ou la microscopie électronique à balayage permettant de confirmer ou d'infirmar la présence du minéral réactif.

En plus d'être très rapide, cet essai est relativement peu coûteux. Cet essai peut servir de préalable à l'acceptation d'un granulat à béton. Toutefois, avant de recommander un granulat il est préférable de procéder à des visites de structures de béton construites à l'aide du dit granulat. Ainsi, l'état des structures devraient refléter le "profil réactif" des granulats. Par contre, il est souvent difficile de vérifier d'autres paramètres importants parce qu'ils dépendent de la mise en place du béton. Le dosage en ciment ainsi que le pourcentage d'alcalis de celui-ci, le rapport eau/ciment et le pourcentage de granulats réactifs utilisés ne sont généralement pas connus lors de la visite des structures.

5.1.2 L'ESSAI DES CYLINDRES DE ROCHE (ASTM C586)

Selon Dolar Mantuani (1983), cet essai est le plus utile au pétrographe puisqu'il simule l'expansion des matériaux réactifs. Il faut toutefois noter que cet essai n'est pas approprié pour déterminer des réactions de type alcalis-silice. Par contre, Newlon et Sherwood (1964) ont obtenu de bonnes corrélations entre cet essai et les résultats d'expansion des prismes de béton en ce qui a trait à la réaction alcalis-carbonates.

Relativement peu coûteux, l'essai consiste à immerger des échantillons de roche préalablement taillés perpendiculairement au litage dans une solution de NaOH 1N à la température ambiante. Trois échantillons taillés perpendiculairement l'un à l'autre sont nécessaires si aucune stratification n'est visible. La norme prescrit une limite d'allongement de 0.1% sans toutefois spécifier l'intervalle de temps.

5.1.3 L'ESSAI CHIMIQUE (ASTM C289)

L'essai chimique a été développé par Mielenz en 1947 (Dolar Mantuani, 1983) pour déterminer exclusivement la réactivité chimique des granulats siliceux. Après un broyage, la fraction de l'échantillon inférieure à 300 microns est introduite dans une solution d'hydroxyde de sodium 1N chauffée à 80°C pendant 24 heures. La réduction d'alcalinité (OH^-) de la solution et le pourcentage de silice dissoute sont par la suite transposés sur un graphique. D'après la position des valeurs obtenues, le granulat doit être qualifié de réactif, potentiellement réactif ou non réactif selon un des trois secteurs du graphique.

Par sa rapidité d'exécution, par le peu de matériel nécessaire et par son coût relativement bas cet essai est présentement l'un des plus populaires. Malheureusement, les résultats obtenus sont souvent contradictoires et devraient

être analysés avec discernement.

Les échantillons contenant des carbonates de calcium et/ou de magnésium, des ions ferreux et des silicates de magnésium donnent des résultats erronés à cause d'une trop forte réduction de la concentration en OH⁻.

5.1.4 L'ESSAI D'EXPANSION DE BARRES DE MORTIER (ASTM C227)

Lui aussi très populaire, l'essai avec barres de mortier nécessite cependant une cure contrôlée de six mois. La grosseur des granulats est réduite à la taille d'un sable avec lequel des barres de 25 X 25 X 300 mm sont confectionnées. Les barres sont par la suite introduites dans des contenants hermétiques à l'intérieur desquels règne une humidité de 95% (voir figure 12). La norme spécifie le dosage en ciment ainsi que le pourcentage d'alcalis de celui-ci (1,25% Na₂O éq.) et permet un ajustement du rapport e/c du mélange en fonction de l'étalement du mortier frais. La température d'entreposage doit être maintenue à 37,8°C ± 1,7°C et les lectures d'expansion doivent être prises à des intervalles réguliers. Une expansion de plus de 0,05% à trois mois ou de plus de 0,10% à six mois classe les granulats sous la mention "réactifs".

D'après les études effectuées par Hooton en 1986, les résultats obtenus avec cet essai seraient grandement influencés par le type de contenants utilisés (Hooton, 1987). Cette observation confirmerait les variations d'expansion des granulats d'un laboratoire à l'autre. De plus, certains granulats reconnus comme étant réactifs ne sont pas détectés par cet essai. En effet, Bérard et Roux (1986) ont démontré que les roches granitoïdes à réaction périphérique et certains calcaires réactifs avec formation de veinules n'étaient pas détectés avec cet essai. L'essai semble uniquement valide pour les granulats très réactifs à court terme (Blanchette, 1989, 1a).

5.1.5 L'ESSAI D'EXPANSION DE PRISMES DE BÉTON (ACNOR A23.2-14A)

L'essai avec prismes de béton est probablement l'essai le plus fiable des essais normalisés. Par contre, il est aussi le plus long avec une cure humide (95% d'humidité) de douze mois à une température de 38°C. Le dosage du ciment ainsi que le pourcentage d'alcalis de celui-ci (de 1,25% Na₂O éq.) sont fixés par la norme. Par contre, le rapport e/c est fonction de l'affaissement du béton frais, ce qui diminue l'importance de la quantité d'eau présente au sein du béton. Comme nous l'avons vu précédemment, l'eau joue un rôle très important dans le processus de la réaction alcalis-granulats. Par ce fait même, la quantité d'eau

devrait être préalablement fixée.

Pour cet essai, des mesures d'allongement effectuées sur une base périodique sont faites sur les prismes de 75 X 75 X 300 mm @ 120 X 120 X 450 mm confectionnés avec des granulats à béton de 20 à 5 mm. Un allongement de plus de 0,04 % à douze mois pour la classe humide ou de plus de 0,075% pour la classe sèche identifie les granulats comme étant réactifs.

Tous les types de roches sont détectés par cet essai sauf les roches de type granitoïde qui sont à réaction très lente (Bérard et Roux, 1986).

5.2 LES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Comme nous l'avons vu dans le sous-chapitre précédent, les essais normalisés possèdent quelques lacunes. Leur fiabilité et leur délai ne sont pas toujours adaptés aux besoins de l'industrie actuelle. Pour cette raison, plusieurs chercheurs ont tenté par divers moyens d'améliorer ces essais en changeant plusieurs variables. D'autres chercheurs ont plutôt élaborés d'autres méthodes d'évaluation de la réactivité des granulats. Nous verrons dans le sous-chapitre suivant une liste de quelques-unes des nouvelles méthodes proposées.

5.2.1 LES ESSAIS À L'AUTOCLAVE

(i) La méthode chimique (Ming-shu et al., 1987)

La procédure de cet essai nécessite un durcissement des barres de mortier de 10 X 10 X 80 mm dans une humidité de 100% pendant les premières vingt-quatre heures. Par la suite, elles subissent un traitement à la vapeur pendant quatre heures. Les barres sont ensuite immergées dans une solution de KOH à 10% et chauffées dans un autoclave à 150°C pour une période de six heures. Les dilatations supérieures à 0,10-0,15% signifient qu'il y a risque de réactivité. Il semble que les auteurs aient obtenu de bonnes corrélations avec les essais ASTM C227 et ASTM C289.

(ii) L'essai japonais (Nishibayashi et al., 1987)

Cette fois, la teneur en alcalis du ciment est augmentée jusqu'à 2,0% Na₂O éq. par l'ajout de solutions salines pour la confection de barres de mortier de 40 X 40 X 160 mm. Ces barres subissent une cure de vingt-quatre heures dans leur moule avant d'être immergées dans l'eau pendant 1, 3 ou 6 jours. Une cure en autoclave avec une pression de 0,15 MPa à une température de 120°C a donné lieu à des expansions importantes après seulement cinq heures de traitement.

Les auteurs affirment que de meilleurs résultats sont obtenus si le pourcentage en alcalis du ciment est de 1,5% Na_2O éq. avec une cure de quatre à cinq heures en autoclave sous une pression de 0,15 MPa.

(iii) Méthode rapide japonaise GBRC (Tamura et al., 1987)

La méthode proposée se fait sur des barres de mortier de dimensions similaires à l'essai de Nishibayashi. Les barres subissent une première cure dans leur moule à 100% d'humidité. Elles sont par la suite introduites dans une autoclave chauffée à 111°C pendant deux heures sous une pression de 0,15 MPa. Après avoir testé plus d'une centaine de granulats, les auteurs concluent que la méthode évalue bien le degré de réactivité des granulats. L'apparition de fissures et/ou la variation de vitesse des ultrasons traversant les échantillons formeraient les critères de l'évaluation.

5.2.2 L'ESSAI DUGGAN (Scott et Duggan, 1987)

L'essai consiste à soumettre des carottes de béton prélevées sur des structures existantes ou fabriquées en laboratoire au cycle Duggan. Les carottes de 22mm par 50mm de long sont soumises à une alternance de cure de préparation dans l'eau distillée à 21°C et dans une chambre à air sec à 82°C.

Après les dix jours de cure préparatoire, les échantillons sont ensuite retournés dans l'eau distillée et mesurés à tous les trois à cinq jours.

De bons pourcentages d'allongement (0,3%) ont été obtenus après vingt jours de cure sur des structures de béton vieilles de douze ans affectées par d'importants signes de réaction. De même, de faibles expansions (0,08%) ont été observées sur des bétons sains âgés d'une quinzaine d'années.

Les échantillons de carottes de laboratoire soumis au cycle ont montré des expansions proportionnelles à la réactivité des granulats testés ainsi qu'à la teneur en alcalis des ciments utilisés.

L'essai est encore au stade expérimental et le manque de données nous empêche de porter une opinion valable sur cette méthode.

5.2.3 L'ESSAI CHIMIQUE DE CHANGEMENT DE VOLUME

(Knudsen, 1987)

La base de cette méthode repose sur la dissolution de la silice par une solution de soude. Le granulat est réduit à la taille d'un sable et est placé dans une solution de NaOH 10 N à une température de 50°C pendant vingt jours. Le

retrait chimique de la silice dissoute est enregistré continuellement. L'auteur fixe un retrait de 0,4 ml par kg de sable comme limite permise. Au delà de celle-ci, le granulat serait considéré réactif.

L'attrait de cet essai se voit dans l'élimination de nombreuses variables reliées à la structure des bétons telles la porosité, le niveau d'humidité, la teneur en alcalis des ciments, etc. Les résultats obtenus sont en concordance avec les résultats recueillis lors de l'essai accéléré des barres de mortier proposé par Chatterji (1978).

5.2.4 BARRES IMMERGÉES DANS UNE SOLUTION DE NaCl

(Chatterji, 1978)

L'essai d'immersion proposé par Chatterji, en 1978, nécessite une cure de six mois. La méthode consiste à confectionner des barres de mortier de 40 X 40 X 160 mm avec des proportions de ciment, granulats et eau de 1:2:0,5. Ces barres sont immergées dans l'eau pendant vingt-huit jours puis transférées dans une solution saturée en sels à une température de 50°C. Une expansion de plus de 0,1% à vingt semaines est jugée néfaste, ce qui est relativement long.

5.2.5 MÉTHODE CHIMIQUE MODIFIÉE (Bérard et Roux, 1986)

Les auteurs proposent une modification de l'essai normalisé ASTM C289 qui, rappelons-le, n'est pas très fiable sous sa formule normalisée. Selon les auteurs, l'essai devrait être effectué selon la procédure normalisée mais sur le résidu insoluble des roches carbonatées. Ces insolubles sont obtenus à la suite d'une digestion des carbonates par l'acide chlorhydrique. Les résultats sont reportés sur l'abaque de l'essai ASTM C289. Toutefois, les résultats ne peuvent servir que de critère d'acceptation mais non de refus. Dans ce dernier cas, d'autres essais supplémentaires sont nécessaires pour évaluer le degré de réactivité des granulats.

5.2.6 L'ESSAI ACCÉLÉRÉ PAR DURCISSEMENT DANS UNE SOLUTION DE NaOH À 80°C (Yoshioka et al, 1987)

La méthode consiste à confectionner des barres de mortier conformément à la méthode ASTM C227 et à les soumettre à une alternance de cures. Après démoulage, les barres sont immergées dans l'eau à 20°C pendant vingt-quatre heures. Elles sont ensuite introduites dans une solution de NaOH 1N à une température de 80°C pendant un autre vingt-quatre heures, pour ensuite être replongées dans l'eau à 20°C pendant vingt-quatre heures. Finalement, les barres

sont réintroduites dans la solution de soude à 80°C pour soixante-douze heures, suivie d'une cure dans l'eau à 20°C pour vingt-quatre heures. La mesure d'expansion finale est prise à ce moment. De bonnes corrélations sont obtenues avec les résultats de la méthode ASTM C227.

5.2.7 ESSAI ACCÉLÉRÉ D'EXPANSION DE BARRES DE MORTIER

(Oberholster et Davies, 1986a)

Des barres de mortier confectionnées conformément à la norme ASTM C227 sont introduites dans une solution de soude 1N à une température de 80°C. La cure s'échelonne sur une période de douze jours. Les auteurs proposent une limite d'expansion de 0,10% comme base d'acceptation ou de refus. Cet essai sera traité en profondeur au chapitre 5.3 puisqu'il se veut l'essai d'étude du présent projet.

5.2.8 ESSAI ACCÉLÉRÉ D'EXPANSION DE PRISMES DE BÉTON

(Blanchette, 1989)

La procédure suivie pour cet essai est la même que pour l'essai proposé par Oberholster hormis les barres de mortier soumises à la cure qui font place aux prismes de béton. Ces prismes sont confectionnés selon la procédure de l'essai normalisé ACNOR A23.2-14A. La cure d'immersion dans la soude 1N à 80°C

s'échellonne sur une période de vingt-quatre jours. L'auteur obtient de bonnes corrélations avec les résultats de l'essai normalisé ACNOR A23.2-14A, ce qui est très révélateur de la fiabilité de l'essai.

Pour le moment, relativement peu d'essais ont été effectués avec cette méthode. Par contre, plusieurs chercheurs Australiens (Shayen et al., 1988) et Québécois (Bérubé et al., 1989) travaillent sur ce type d'essai et semblent obtenir de bons résultats.

5.2.9 ESSAI ACCÉLÉRÉ D'EXPANSION DE MINI-PRISMES DE ROCHES (Blanchette, 1989)

Dérivé de l'essai ASTM C586, cet essai a été expérimenté dernièrement à l'Ecole Polytechnique de Montréal ainsi qu'à Université Laval. Les conditions de cure des échantillons de roche taillés selon la norme ASTM C586 accélèrent les expansions. On introduit les mini-prismes dans une solution de soude chauffée à 80°C. L'auteur indique toutefois que des difficultés de prise de mesure peuvent intervenir lorsque les prismes se désintègrent sous l'intensité de la cure.

5.3 ÉVALUATION DE L'ESSAI ACCÉLÉRÉ D'EXPANSION DES BARRES DE MORTIER

5.3.1 HISTORIQUE

Initialement proposé par Van Aardt et Visser en 1982, l'essai accéléré avec barres de mortier fut étudié par Oberholster et Davies qui publièrent leurs résultats en 1986. Cette étude effectuée sur une trentaine de granulats permit de proposer une limite d'expansion de 0,11% à douze jours.

De son côté, lors de son projet de Maîtrise à l'Ecole Polytechnique de Montréal, Blanchette (1989) a étudié divers paramètres importants qui n'avaient pas été retenus jusque là: l'influence du rapport e/c, l'impact du temps de lecture et l'évolution de la concentration de la solution de soude pendant l'essai. D'autres variables ont été vérifiées telles la normalité de la solution et l'influence du type de contenants.

A la lumière de ces observations, lors de nos travaux nous avons procédé selon la méthode proposée par Blanchette.

5.3.2 ÉVALUATION DES MANIPULATIONS DE L'ESSAI ACCÉLÉRÉ

(i) **La température:** une température plus haute que 38°C accélère grandement les expansions (Diamond 1981, Stark et Bhatti, 1985). Pour cette raison, nous avons utilisé la même température qu'avait initialement proposée Van Aardt et Visser (1982), soit de 80°C. Une température supérieure pourrait entraîner un taux trop élevé d'évaporation de la solution. La température est maintenue à $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ grâce à une cuve isolée, illustrée à la figure 13.

(ii) **Le type de solution:** tout comme l'indique les travaux sur divers types de solution, l'utilisation de NaOH semble améliorer les résultats d'expansion versus l'utilisation de KOH. Par contre Chatterji (1987), indique que des expansions plus importantes sont obtenues si les alcalis sont sous forme de sels (PO_4^{3-} , NO_3^- , Cl^- , NO_2^-) plutôt que sous forme d'hydroxyde (OH^-). Pour la présente étude nous voulions conserver le plus de paramètres initialement proposés par les travaux précédents concernant l'essai accéléré. Pour cette raison, nous avons utilisé une solution de NaOH de 1N.

(iii) **La concentration de la solution de NaOH:** selon Blanchette (1989), l'augmentation de la normalité de la concentration semble affecter de façon directe les expansions des barres de mortier. Il note toutefois que de bons résultats

sont obtenus avec une concentration de 1N, tel que suggéré par Oberholster et Davies. La concentration de la solution de 1N ne diminue que légèrement au cours de l'essai, (passant de 1N à 0,94N à quatorze jours). L'augmentation de la concentration rend les manipulations de mesures beaucoup plus dangereuses. De ce fait, nous avons effectué nos travaux en utilisant une solution de soude de 1N.

(iv) Le temps de mesure: le temps de lecture proposé initialement par Oberholster et Davies était de quelques secondes (7 sec.) après le retrait des barres de la solution. Par contre, Blanchette propose plutôt un délai de quinze minutes entre le retrait des barres de la solution et la mesure de celles-ci. La contraction thermique des échantillons étant très rapide dans les premières secondes elle laisse une trop grande marge d'erreur au manipulateur. Toutefois, ce "rétrécissement" thermique devient plus lent après quelques minutes, ce qui nous semble plus approprié pour effectuer une lecture sans grand écart type.

Blanchette soulève un autre point important en stipulant que les manipulations lors des mesures sont beaucoup plus délicates dans les premières secondes puisque la température des barres avoisine les 80°C. A cette température, les manipulations doivent se faire très rapidement ce qui nous semble peu attrayant. De plus, lors du retrait de la solution des échantillons, ceux-ci ruissellent de solution corrosive qui pourra éventuellement endommager l'appareil

de mesure (figure 11) s'ils n'ont pas le temps de sécher; ce qui n'est pas le cas après quinze minutes.

(v) L'impact du rapport e/c: la porosité des barres joue un rôle évident dans l'infiltration de la solution au sein de celles-ci:

" Plus la soude peut rejoindre facilement les particules siliceuses réactives, plus la réaction sera importante et rapide."(Blanchette, 1989).

Cette porosité est grandement influencée par la quantité d'eau utilisée dans les mélanges. Blanchette a observé une augmentation des expansions en haussant le rapport e/c. Pour nos échantillons, nous avons fixé le rapport e/c à 0,45 sans tenir compte de l'étalement des mélanges tel que stipulé par la norme ASTM C227.

(vi) L'effet des contenants: les contenants utilisés (voir figure 14) ne semblent pas avoir d'influence sur les échantillons (Blanchette, 1989). Nous avons donc disposé nos barres de mortier à l'horizontal dans des contenants de polypropylène résistants à de hautes températures. Ces contenants (spécifications en annexe) sont fabriqués par une industrie bien connue et sont vendus dans plusieurs magasins.

(vii) **Limite d'expansion:** Nous avons conservé la limite de 0,10% à douze jours comme l'avait proposé Blanchette (1989). Au delà de cette limite les granulats sont considérés réactifs.

5.3.3 MÉTHODOLOGIE DE L'ESSAI ACCÉLÉRÉ

Telle que citée précédemment, la confection des barres se fait conformément à la procédure établie pour la norme ASTM C227. Par contre, la mesure de l'étalement n'est pas requise puisque le dosage en eau est fixé par le rapport e/c de 0,45.

Nous avons ajouté 1% du volume d'eau de superplastifiant de sulfonate de naphthalène du type "WRDA 19" à tous nos mortiers pour limiter au maximum les variations des proportions des constituants des mélanges. L'utilisation de superplastifiant a été rendu nécessaire lorsque nous utilisions des pourcentages élevés de remplacement du ciment par les divers ajouts minéraux. La maléabilité des mortiers frais aurait été dans certains cas très réduite.

La teneur en alcalis du ciment utilisé a été rehaussée artificiellement à 1,25% par l'ajout de soude. Il faut noter que l'immersion des barres dans la solution de soude 1N diminue grandement l'influence de la teneur en alcalis du

ciment. Cependant, l'effet des alcalis n'est pas négligeable pour ce qui est des barres entreposées à 100% d'humidité à 23°C comme le prescrit la norme ASTM C227. Rappelons que l'essai accéléré est effectué parallèlement à l'essai ASTM C227 pour chaque mélange.

Après une cure de vingt-quatre heures à 100% d'humidité et à une température de 23°C, les barres sont démoulées. Une mesure, à titre indicatif, est prise à ce moment. Les barres sont par la suite introduites dans le contenant rempli d'eau distillée à 23°C, puis entreposées dans la cuve où la température est maintenue à 80°C. De cette façon, la température de l'eau s'élève graduellement jusqu'à 80°C évitant, ainsi, tout choc thermique.

Les barres sont mesurées après un séjour de vingt-quatre heures dans l'eau. Après cette période, les barres ont subi une expansion thermique. Par ce fait, un délai de quinze minutes est observé après le retrait des échantillons avant la prise de la mesure initiale. Ce délai sera toujours respecté entre le retrait des barres de la solution et la prise de la mesure de l'allongement.

Lorsque la mesure initiale est prise, les barres sont remises dans les contenants dans lesquels une quantité de NaOH solide a été préalablement ajoutée. La quantité de soude ajoutée portera la concentration de la solution de

NaOH à 1N.

Enfin, les barres de mortier sont mesurées à intervalles réguliers pour suivre l'évolution des expansions. La cure se prolonge sur une période de douze jours à partir de la mesure initiale.

Les expansions sont exprimées en pourcentage par rapport à la longueur de la barre lors de la mesure initiale. La limite maximum d'expansion permise a été fixée à 0,10% à douze jours. Au delà de cette limite, les granulats sont considérés réactifs.



Fig. 11: Appareil de mesure des barres de mortier.

Fig. 12: Contenant type servant à l'entreposage des barres de mortier pour l'essai ASTM C227.





Fig. 13 : Vue extérieure de la cuve isolée servant à la cure à 80° C de l'essai accéléré.



Fig. 14 : Contenant type servant à l'entreposage des barres de mortier pour la cure de l'essai accéléré.

CHAPITRE 6

PÉTROGRAPHIE DES GRANULATS

6.1 LES GRANULATS

Nous avons utilisé quatre granulats lors de nos travaux. Ces granulats représentent différents faciès géologiques et, selon la littérature, ils possèdent des niveaux différents de réactivité.

Ainsi, un granulat de calcaire provenant de l'Ontario a été choisi à cause de sa très grande réactivité qui en a aussi fait un granulat de recherche mis à la disposition des chercheurs par le gouvernement ontarien. Un tuf rhyolitique de la région de Beauceville a été utilisé comme granulat de réactivité élevée. Un faciès de schiste chloriteux de la région de Sherbrooke ayant un niveau de réactivité moyen a aussi été retenu comme granulat. Enfin, un faciès de dolomie de la région de Valleyfield sur lequel il n'est fait aucune mention de réactivité a aussi été utilisé.

6.2 CALCAIRE D'OTTAWA

Le calcaire d'Ottawa appartient à la formation Bobcaygeon d'âge Ordovicien moyen (Durand, 1988). Cette formation se retrouve au Québec sous les faciès équivalents au Leray, Ouareau, Mile-End et Deschambault. Le granulat utilisé provient de la carrière Spratt située dans la région d'Ottawa.

Pétrographiquement, le granulat est un calcaire à grains fins constitué de cristaux de calcite et de faible quantité de dolomite. Blanchette (1989) et Durand (1988) ont utilisé ce granulat lors de leurs travaux et ils ont évalué entre 4% et 13% le pourcentage d'insolubles de ce granulat. Ceux-ci sont essentiellement constitués de quartz, chert, calcédoine, illite et pyrite. Le chert et la calcédoine présents sont les phases siliceuses responsables du taux de réactivité du granulat. On retrouve ces phases surtout au sein de certains fossiles ayant subi un début de silicification.

La publication de travaux concernant ce calcaire est plutôt considérable puisque toutes les structures construites avec ce granulat montrent généralement des signes de réactivité importante. De nos jours, ce granulat n'est plus utilisé pour la construction en béton.



Fig. 15: Calcaire d'Ottawa en lame mince. Présence de chert dans certains fossiles.(X 25)
(Lumière polarisée)



Fig. 16: Calcaire d'Ottawa en lame mince avec fossile silicifié.(Lumière polarisée, X 25)

6.3 TUF RHYOLITIQUE DE BEAUCEVILLE

Ce tuf rhyolitique provient du groupe géologique de Magog (Cousineau, 1984).

Le tuf est principalement constitué d'une matrice de quartz micro-cristallin, de minéraux argileux, d'épidote et de pyrite dans laquelle baignent des phénocristaux de quartz, de plagioclases et de calcite. Une altération de damouritisation affecte la plupart des plagioclases (Blanchette, 1989).

La réactivité de ce granulat a été observée par Bérubé et Fournier (1987) lors d'études sur les structures du barrage de Sartigan, en Beauce. Blanchette (1989) qualifie d'élévée la réactivité de ce granulat.



Fig. 17: Tuf rhyolitique de Beauceville en lame mince.
(Lumière polarisée, X 25)



Fig. 18: Tuf rhyolitique de Beauceville en lame mince.
(Lumière polarisée, X 25)

6.4 SCHISTE CHLORITEUX DE SHERBROOKE

Comme son appellation l'indique, ce faciès géologique a subi un faible métamorphisme associé à l'orogène Appalachienne de la région des Cantons de l'Est. Ce faciès géologique appartient à la formation d'Ascott de l'Ordovicien moyen, (St-Julien et Lamarche, 1965).

De couleur vert clair, cause principale de la présence abondante de la chlorite, ce schiste est surtout à grains fins. On retrouve du quartz, des feldspaths, de la séricite et de la calcite (Blanchette, 1989 et Durand, 1988). On observe la présence de hornblende, d'actinote, d'épidote et de minéraux opaques tels la magnétite et la pyrite.

Grattan-Bellew (1982) associe le quartz à extinction ondulante et le microquartz à la réactivité du granulit. De nombreuses structures faites à base de ce granulit et de ciment Portland de la région de Sherbrooke sont affectées par les symptômes d'une réactivité alcalis-granulats.

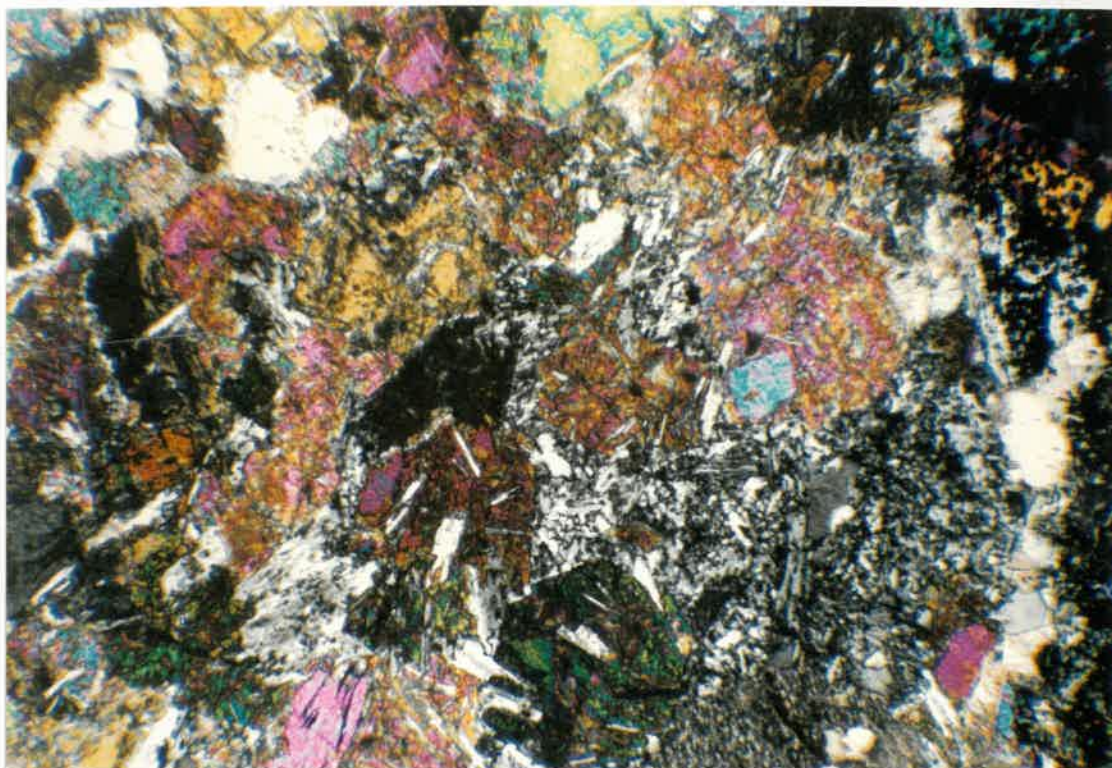


Fig. 19: Schiste chloriteux de Sherbrooke en lame mince.
Faciès contenant beaucoup d'olivine.
(Lumière polarisée, X 25)

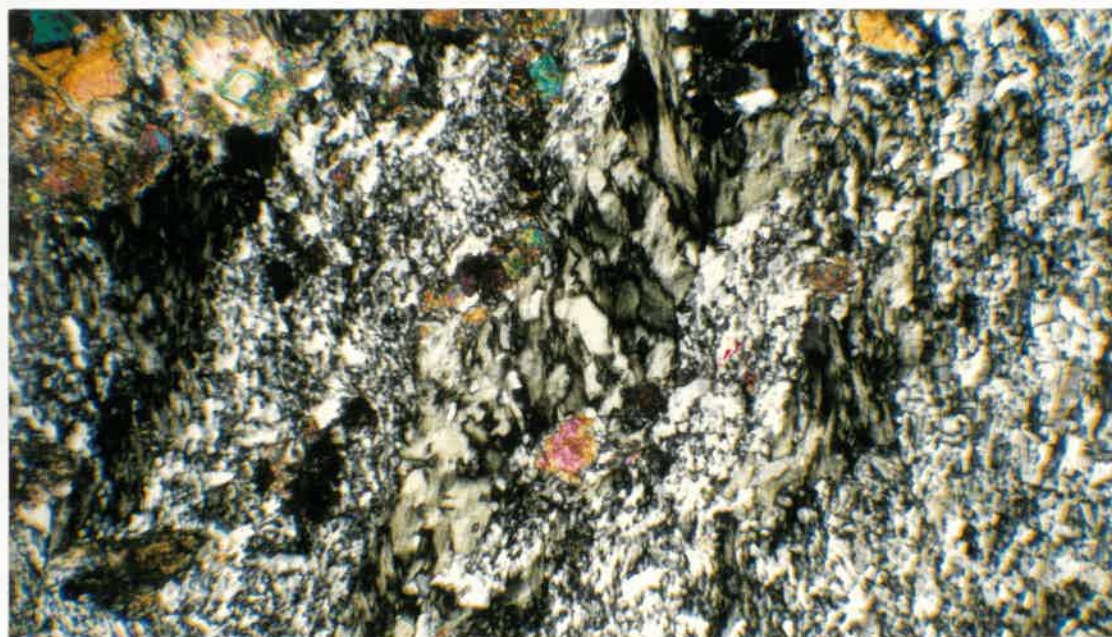


Fig 20: Schiste chloriteux de Sherbrooke en lame mince.
(Lumière polarisée, X 25)

6.5 DOLOMIE DE VALLEYFIELD

La dolomie utilisée provient du groupe de Beekmantown daté de l'Ordovicien et qu'on retrouve au Québec dans la région au sud de Valleyfield et jusqu'au nord de Joliette. Ce groupe possède une épaisseur moyenne de 500 pieds (Clark et Globensky, 1976) et est caractérisé par deux faciès dolomitiques; une dolomie à grains fins relativement pure correspondant à la formation de Beauharnois et une dolomie gréseuse à grains moyens correspondant à la formation de Thérèse.

Nous avons utilisé les deux faciès correspondant à la dolomie relativement pure et à la dolomie gréseuse. Le faciès relativement pur présente quelques minces laminations argileuses noires traversant l'ensemble des grains de dolomite. La dolomite constitue au delà de 90% de la roche. Quelques grains de quartz et de feldspaths sont présents mais en faible quantité. Le faciès plus gréseux est constitué d'environ 40% de grains de quartz mesurant 0.03mm de diamètre, d'une faible quantité de feldspaths et de calcite.

Relativement peu de travaux de recherche ont été effectués sur la dolomie du Beekmantown. Le comportement "réactif" de celle-ci nous était donc inconnu lorsqu'a débuté nos travaux. Toutefois, aucune dolomie réactive n'avait été détectée jusqu'à maintenant. Par contre, tout récemment, Bérard, J. (comm.

pers., 1990) a reconnu la présence de fissures remplies de gel siliceux dans des granulats de dolomie lors d'une investigation de structure.

En Ontario, plus précisément à Kingston, on retrouve un faciès dolomitique de la formation de Gull River reconnu comme réactif (Dolar Mantuani, 1983 et Durand, 1985).



Fig. 21: Dolomie de Valleyfield en lame mince. Faciès à grains fins. (Lumière polarisée, X 25)



Fig. 22: Dolomie de Valleyfield en lame mince. Faciès grèseux. (Lumière polarisée, X 25)

CHAPITRE 7

RÉSULTATS

7.1 RÉSUMÉ

Nous avons produit un total de soixante-six mélanges de mortier correspondant à cent quatre-vingt-dix-huit barres de mortier. Les quatre granulats décrits précédemment ont été utilisés dans la présente étude. Les barres de mortier ont été confectionnées conformément à la norme ASTM C305 et ont été parallèlement soumises à deux essais d'expansion: l'essai ASTM C227 et l'essai accéléré.

Nous avons effectué des remplacements en poids du ciment avec trois additifs minéraux. Ces additifs, une fumée de silice condensée provenant de l'usine SKW de Bécancour, un laitier silicaté granulé de la région de Varennes et un additif chimique, le carbonate de lithium, ont été incorporés aux mélanges de mortier sous divers pourcentages. Le tableau #1 résume les mélanges effectués.

ESSAIS ASTM C227 et ACCELERE

	ADDITIFS		
GRANULAT	FSC	LSG	Li ₂ CO ₃
OTTAWA	5%	5%	0,5%
	10%	10%	1,0%
	15%	15%	1,5%
BEAUCEVILLE	5%	50%	—
	10%	10%	—
	15%	15%	—
SHERBROOKE	5%	50%	—
	10%	10%	—
	15%	15%	—
VALLEYFIELD	5%	50%	—
	10%	10%	—
	15%	15%	—

Tableau 1. Résumé des mélanges de mortier pour chaque granulats.

L'analyse chimique détaillée de ces additifs paraît en annexe.

Dans les sous-chapitres suivants, nous discutons des résultats obtenus avec ces différents mélanges. Chaque granulat y est traité individuellement pour les deux types d'essai selon divers paramètres:

1- Les résultats d'allongement des barres de mortier en fonction du pourcentage de remplacement des additifs sont présentés sous forme graphique. Ces mesures correspondent à une moyenne d'allongement de trois barres de mortier. Elles ont pour but d'illustrer, sans interprétation, l'évolution de la réactivité des granulats pendant la période de la cure. On note une légère baisse dans l'évolution des expansions de l'essai ASTM C227 à trois mois. Par contre, cette anomalie ne semble pas affecter les résultats à six mois.

2- A l'aide de régressions, nous avons établi la tendance des courbes d'expansion en fonction du temps pour chaque niveau de remplacement d'additif. De cette façon, il sera plus facile d'observer l'évolution de la réactivité puisque chaque niveau de remplacement est représenté par une courbe. Nous verrons que pour certains granulats, la forme des courbes de chaque niveau de remplacement est très révélatrice. Un numéro est attribué à chaque courbe et les équations des régressions correspondantes sont disposées sous forme de tableau à la fin de ce

sous-chapitre.

3- Nous avons aussi traité nos résultats en considérant les pourcentages de réduction d'expansion calculés pour les trois additifs à la fin des essais. Ces réductions d'expansion correspondent aux mesures d'allongement prises à douze jours pour l'essai accéléré et à six mois pour l'essai ASTM C227. Les réductions d'expansion sont calculées à partir de l'échantillon de contrôle. On utilise des histogrammes pour présenter les pourcentages de réduction d'expansion selon les pourcentages de remplacement variant de 5% à 70% pour les essais ASTM C227 et accéléré. Ainsi, l'effet des additifs minéraux sur les réactions au sein des mélanges de mortier peut être facilement observé au terme de chaque essai.

4- Enfin, nous avons évalué le pourcentage de remplacement de chaque additif nécessaire pour obtenir un taux de réactivité "acceptable" pour chaque granulats utilisé, i.e. sous les limites d'expansion fixées pour les deux essais. Nous verrons que ces niveaux de remplacement diffèrent d'un essai à l'autre.

7.2 CALCAIRE D'OTTAWA

Le calcaire d'Ottawa utilisé est reconnu comme étant très réactif aux alcalis du ciment. Il est en effet utilisé par différents laboratoires comme échantillon de référence grâce à l'initiative du Ministère des Transports et des Communications de l'Ontario qui possède une réserve importante de matériaux homogènes. Ce granulat fut soumis aux deux essais d'expansion: l'essai accéléré et l'essai ASTM C227. Nous avons produit plusieurs mélanges de mortier dans lesquels on a fait varier le pourcentage de remplacement (en poids du ciment) de trois additifs. Pour l'utilisation de la fumée de silice condensée, nous avons effectué des remplacements de 5%, 10%, 15%. Cinq différents remplacements ont été réalisés pour le laitier silicaté granulé soit de 5%, 10%, 15%, 50% et 70%. De plus, nous avons expérimenté des remplacements avec du carbonate de lithium, Li_2CO_3 , sous des remplacements de 0,5%, 1,0% et 1,5%.

7.2.1 Calcaire d'Ottawa versus FSC

1- En essai accéléré et en essai normalisé ASTM C227, l'ajout de fumée de silice réduit de façon significative l'expansion des barres de mortier. Nous avons noté des réductions d'expansion proportionnelles au taux de remplacement sauf pour un remplacement de 5% concernant l'essai ASTM C227. Tel que l'indique le

graphique de la figure 23, ce niveau de remplacement augmente l'expansion des barres de mortier par rapport à l'échantillon contrôle (sans remplacement).

2- En ce qui concerne l'essai ASTM C227, la tendance des courbes d'expansion est linéaire, et ce pour tous les niveaux de remplacement. Le graphique de la figure 25 illustre la tendance de ces courbes. Il faut toutefois souligner qu'il y a une diminution de la pente des courbes avec l'augmentation du remplacement de la fumée de silice.

Avec l'essai accéléré, la tendance des courbes est différente: la forme convexe de la courbe de l'échantillon de contrôle devient graduellement concave avec l'augmentation de la quantité de FSC en passant par la forme linéaire à 5% de remplacement. Un abaissement graduel des courbes est observé avec l'augmentation du taux de remplacement de FSC. Le graphique de la figure 26 illustre l'évolution de la tendance des courbes pour la FSC avec l'essai accéléré.

3- L'histogramme de la figure 27 illustre les pourcentages des réductions observées au terme de chaque essai. L'histogramme démontre une transition graduelle sans "discontinuités" de l'augmentation des réductions d'expansion face à l'augmentation du taux de remplacement de FSC pour l'essai accéléré. Une augmentation des réductions d'expansion beaucoup moins uniforme est observée

pour ce qui est de l'essai ASTM C227.

4- Avec l'essai accéléré, un remplacement de 15% de fumée de silice est nécessaire pour rendre le granulat non réactif. En effet, l'expansion obtenue avec ce pourcentage de FSC est sous la limite d'expansion permise fixée pour cet essai. Par contre, l'essai ASTM C227 classe ce granulat de non réactif avec ou sans ajout de fumée de silice.

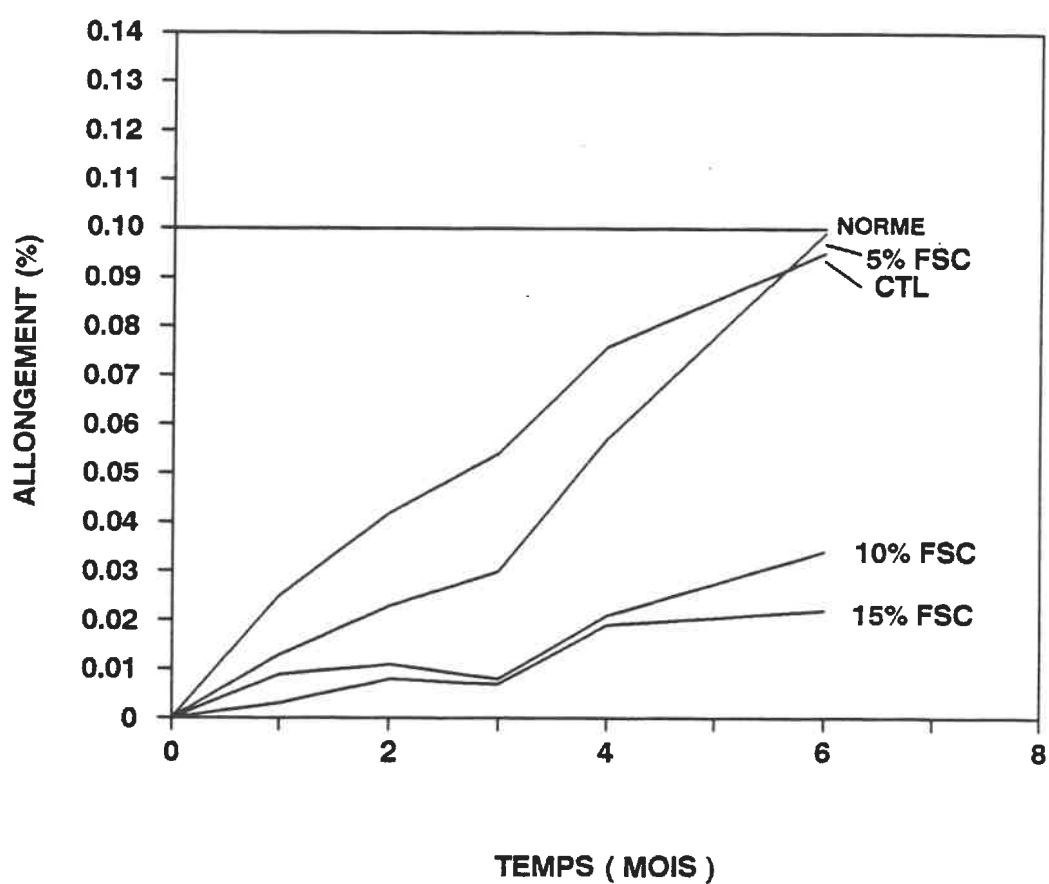
GRANULAT OTTAWA / ADDITIF FSC**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 23: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat Ottawa et la fumée de silice condensée pour l'essai ASTM.

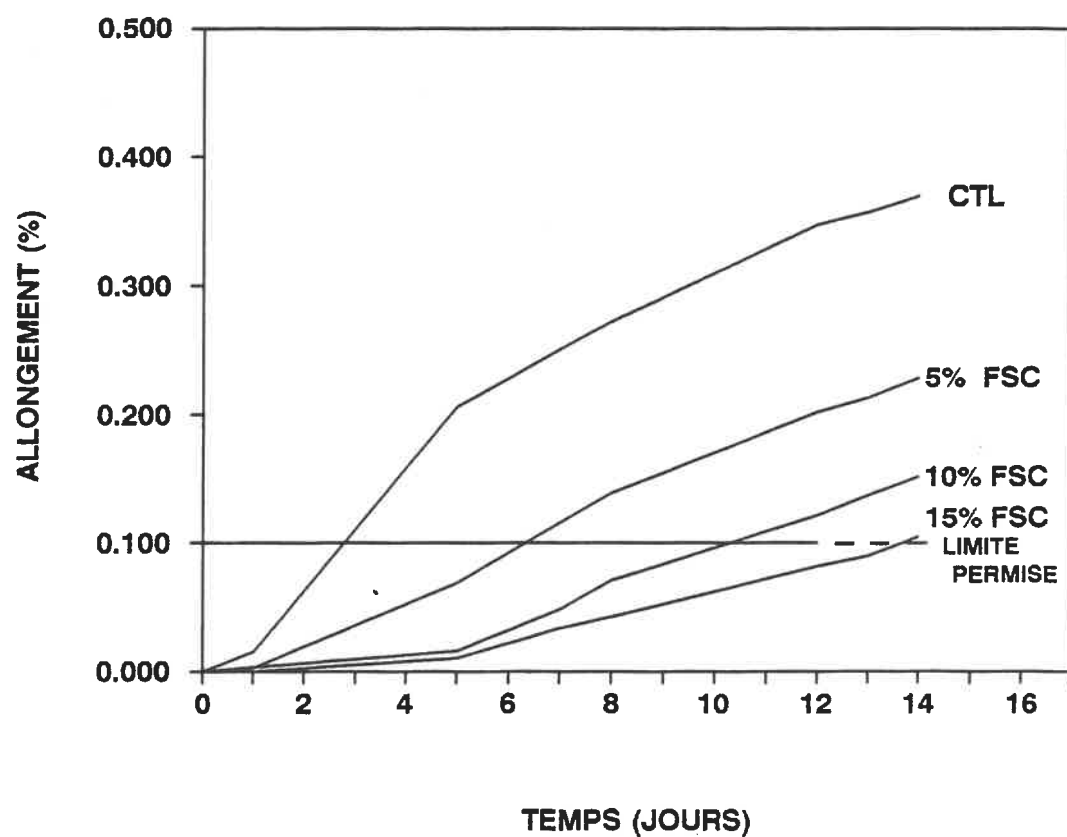
GRANULAT OTTAWA / ADDITIF FSC**ESSAI ACCELERE**

Fig. 24: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats Ottawa et la fumée de silice condensée pour l'essai accéléré.

GRANULAT OTTAWA / ADDITIF FSC
ESSAI ASTM C227
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

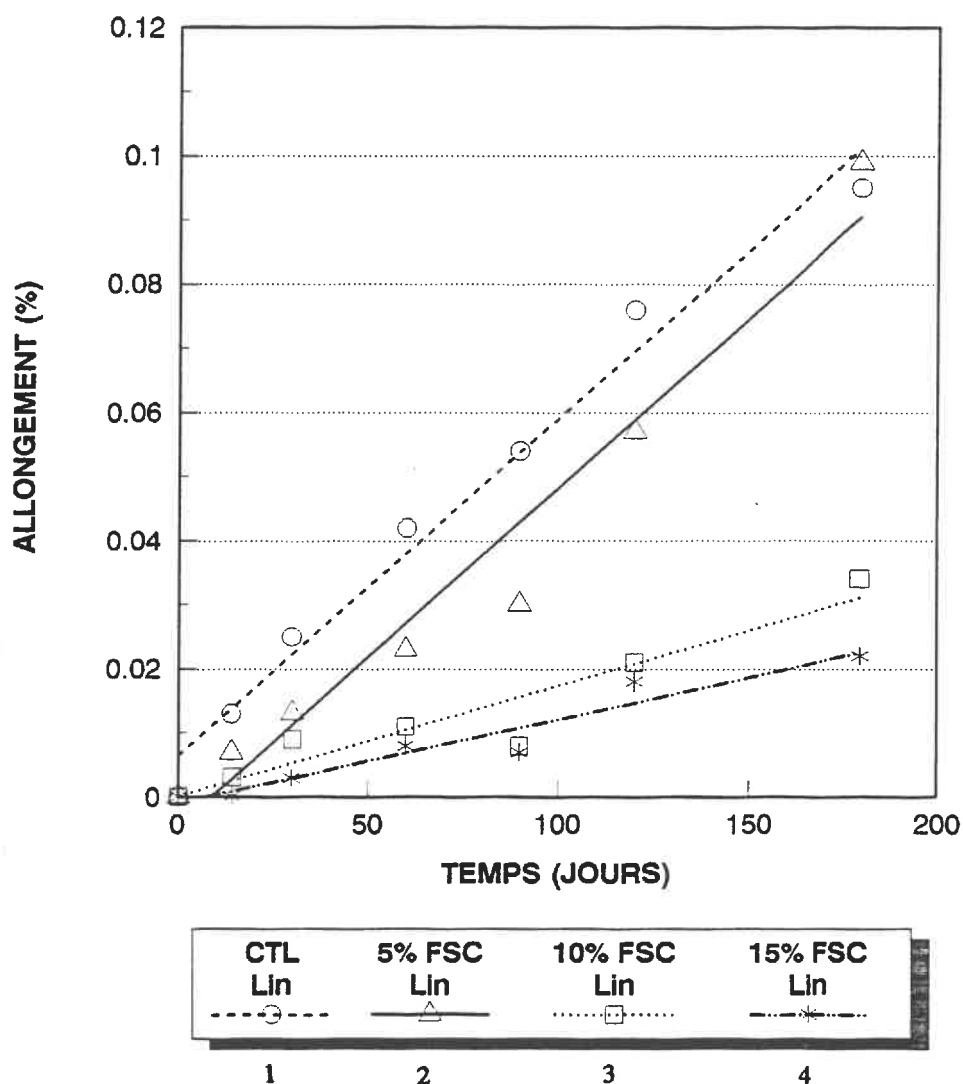


Fig. 25: Tendence des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT OTTAWA / ADDITIF FSC
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

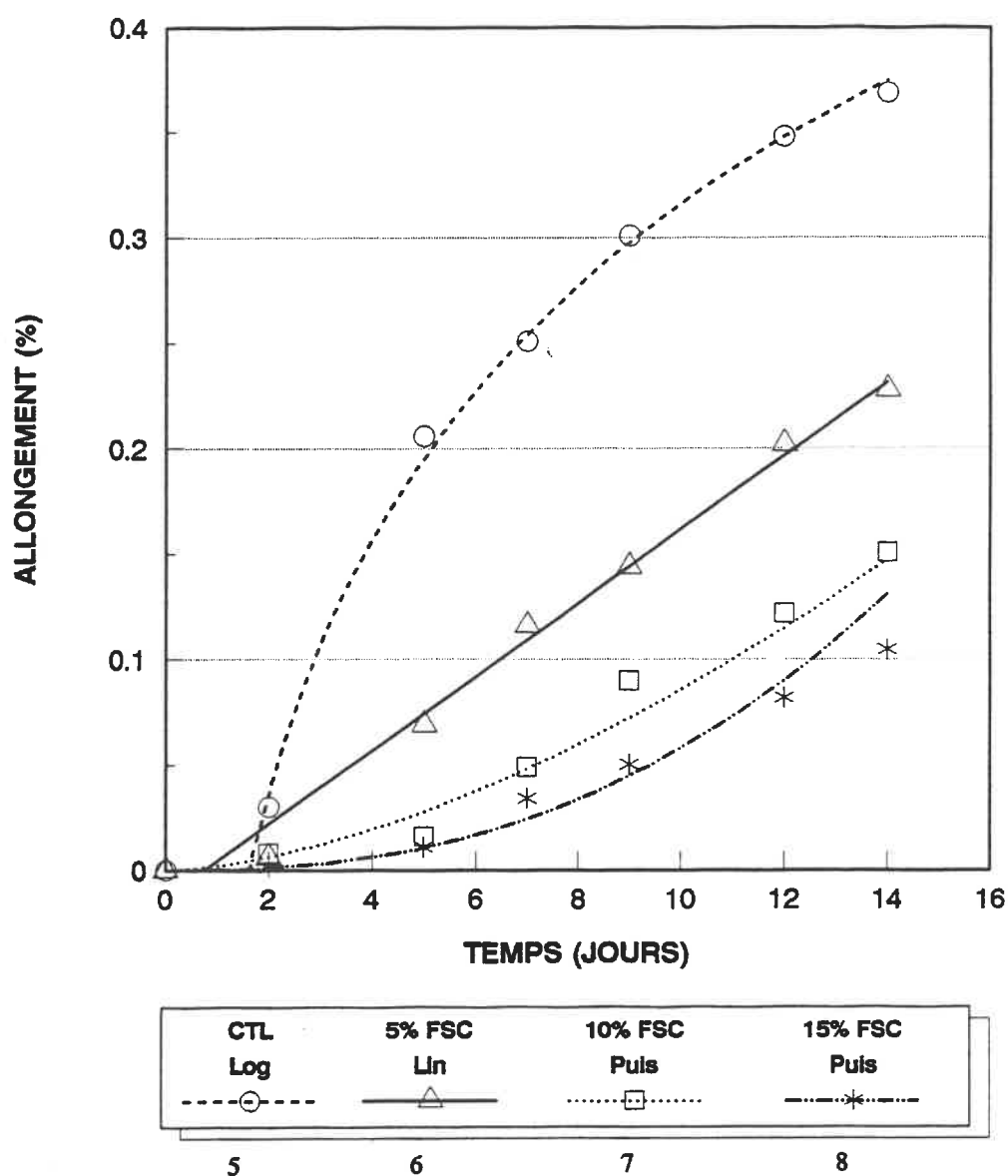


Fig. 26: Tendence des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.

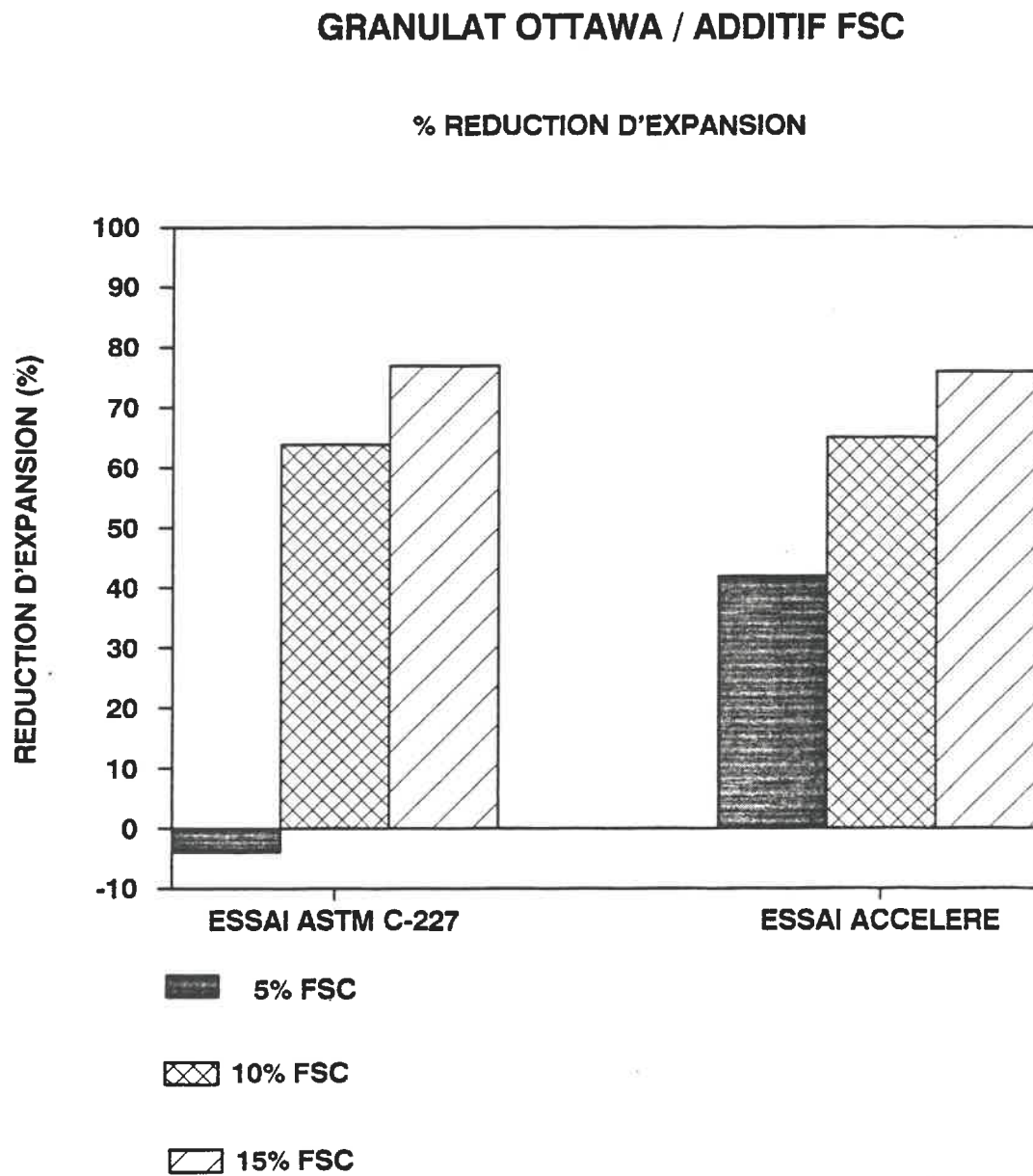


Fig. 27: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice pour le calcaire d'Ottawa.

7.2.2 Calcaire d'Ottawa versus LSG

1- Avec les mélanges confectionnés avec un laitier silicaté en remplacement du ciment, nous avons obtenu des expansions relativement similaires entre l'essai accéléré et l'essai normalisé comme l'indiquent les graphiques des figures 28 et 29.

2- Pour l'essai ASTM C227, la tendance des courbes d'expansion débute de façon linéaire pour ensuite tendre vers une faible convexité avec l'augmentation de la quantité de LSG. Sur le graphique de la figure 30 on observe deux familles de courbes: une première famille ayant une pente prononcée, regroupant les courbes de 0 à 15% de remplacement par du LSG, et une deuxième famille caractérisée par un fléchissement progressif des courbes, correspondant à 50% et 70% de LSG.

La tendance des courbes d'expansion pour l'essai accéléré est plutôt convexe pour de faibles remplacements pour ensuite devenir linéaire et faiblement concave pour des taux de 50% de remplacement et plus. Comme pour l'essai ASTM on retrouve les deux familles de courbes avec leur profil caractéristique. Les graphiques des figures 30 et 31 illustrent la tendance des courbes pour les deux essais.

3- Pour les deux essais, les réductions d'expansion sont assez faibles pour des taux de remplacement de moins de 15% comme le montre l'histogramme de la figure 32. Les réductions d'expansion avec un remplacement de plus de 50% sont, par contre, très importantes (de l'ordre de 60% et plus) et ce pour les deux types de cures.

Pour l'essai ASTM C227, avec 5% de remplacement de LSG nous observons une réduction d'expansion légèrement supérieure à celle des remplacements de 10% et 15%, ce qui n'est pas concordant aux hypothèses émises: nous devrions logiquement observer de plus grandes réductions d'expansion pour de plus grands taux de remplacement de LSG.

Pour l'essai accéléré, les pourcentages des réductions d'expansion sont visuellement proportionnels aux taux de remplacement de LSG.

4- Selon l'essai accéléré, un pourcentage de remplacement de l'ordre de 70% n'est pas suffisant pour rendre le granulat non réactif. En effet, l'expansion obtenue à ce taux de remplacement de LSG est légèrement au-dessus de la limite permise à douze jours. Pour l'essai ASTM l'utilisation de LSG ne semble pas nécessaire puisque le granulat n'est pas considéré réactif.

GRANULAT OTTAWA / ADDITIF LSG

ESSAI ASTM C-227

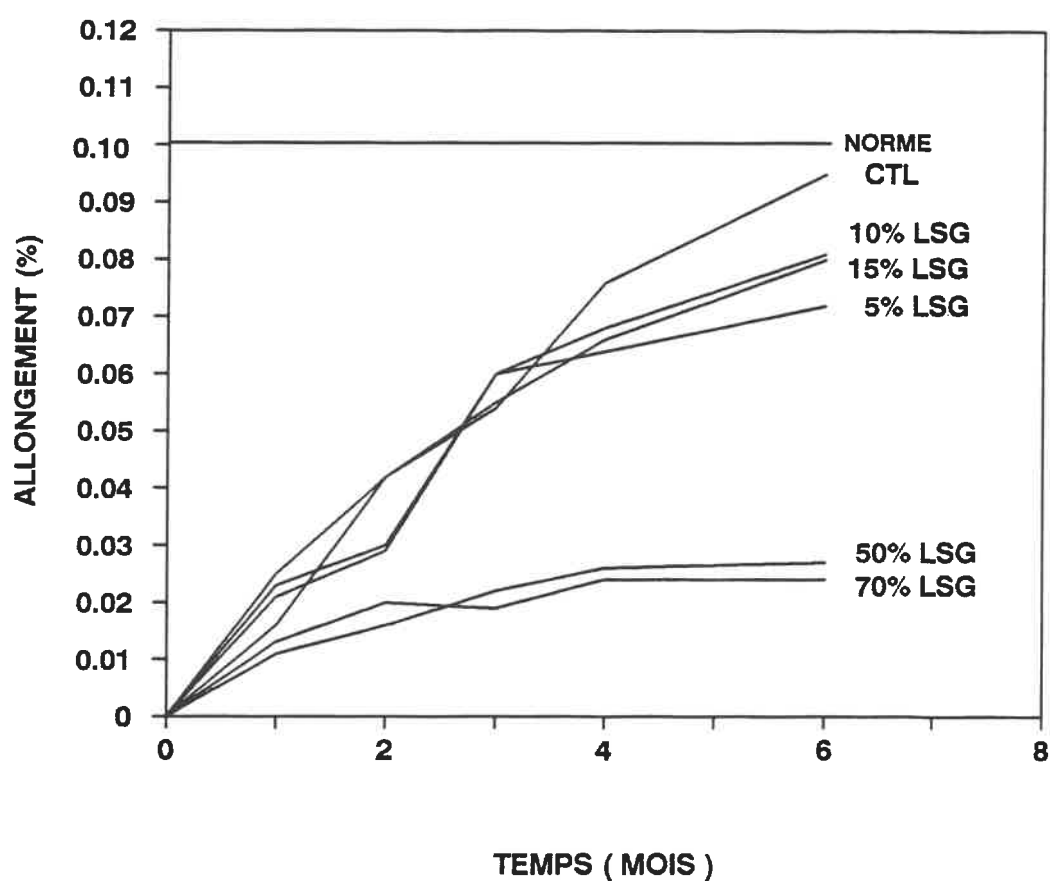


Fig. 28: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat Ottawa et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.

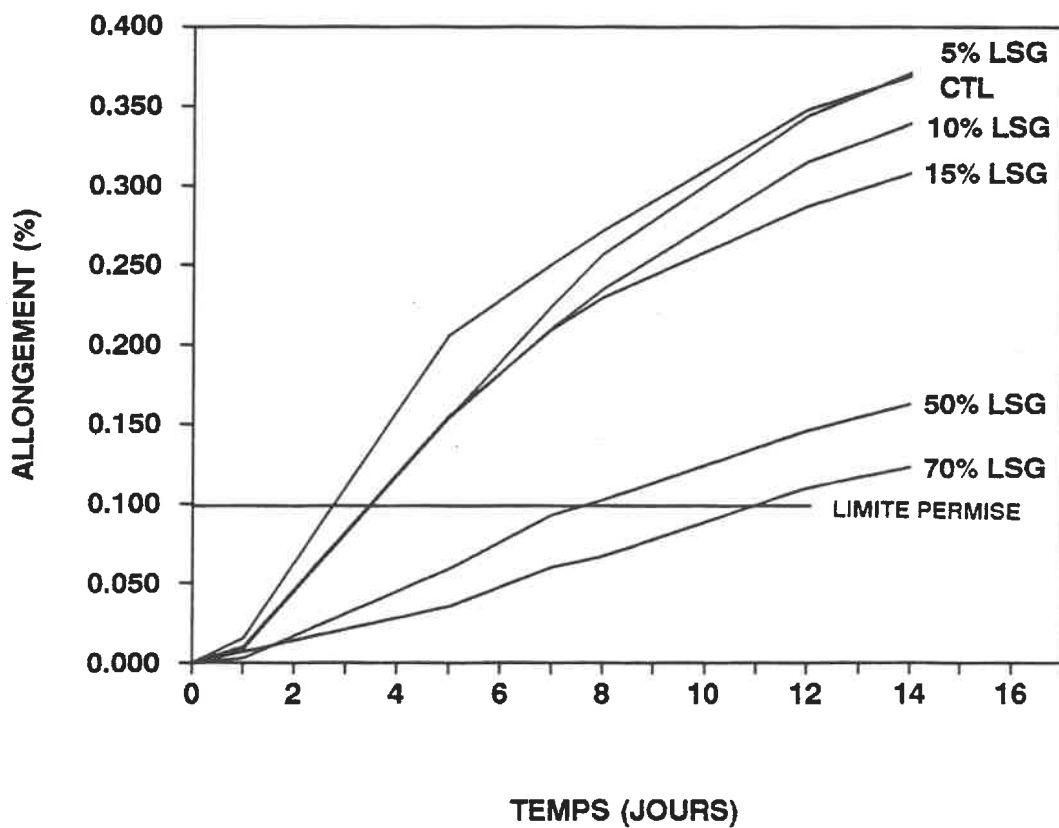
GRANULAT OTTAWA / ADDITIF LSG**ESSAI ACCELERE**

Fig. 29: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats Ottawa et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.

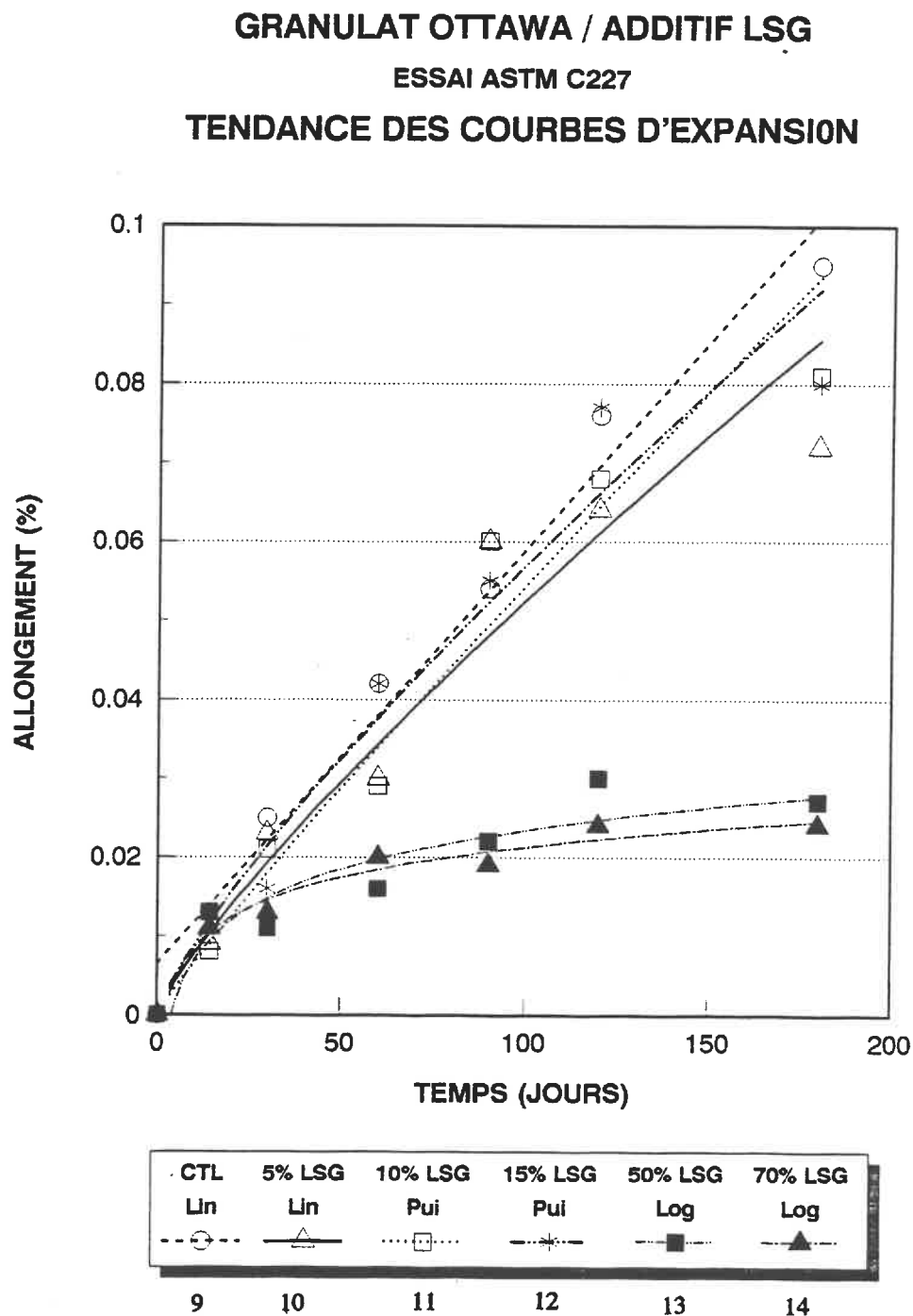


Fig. 30: Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.

GARNULAT OTTAWA / ADDITIF LSG
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

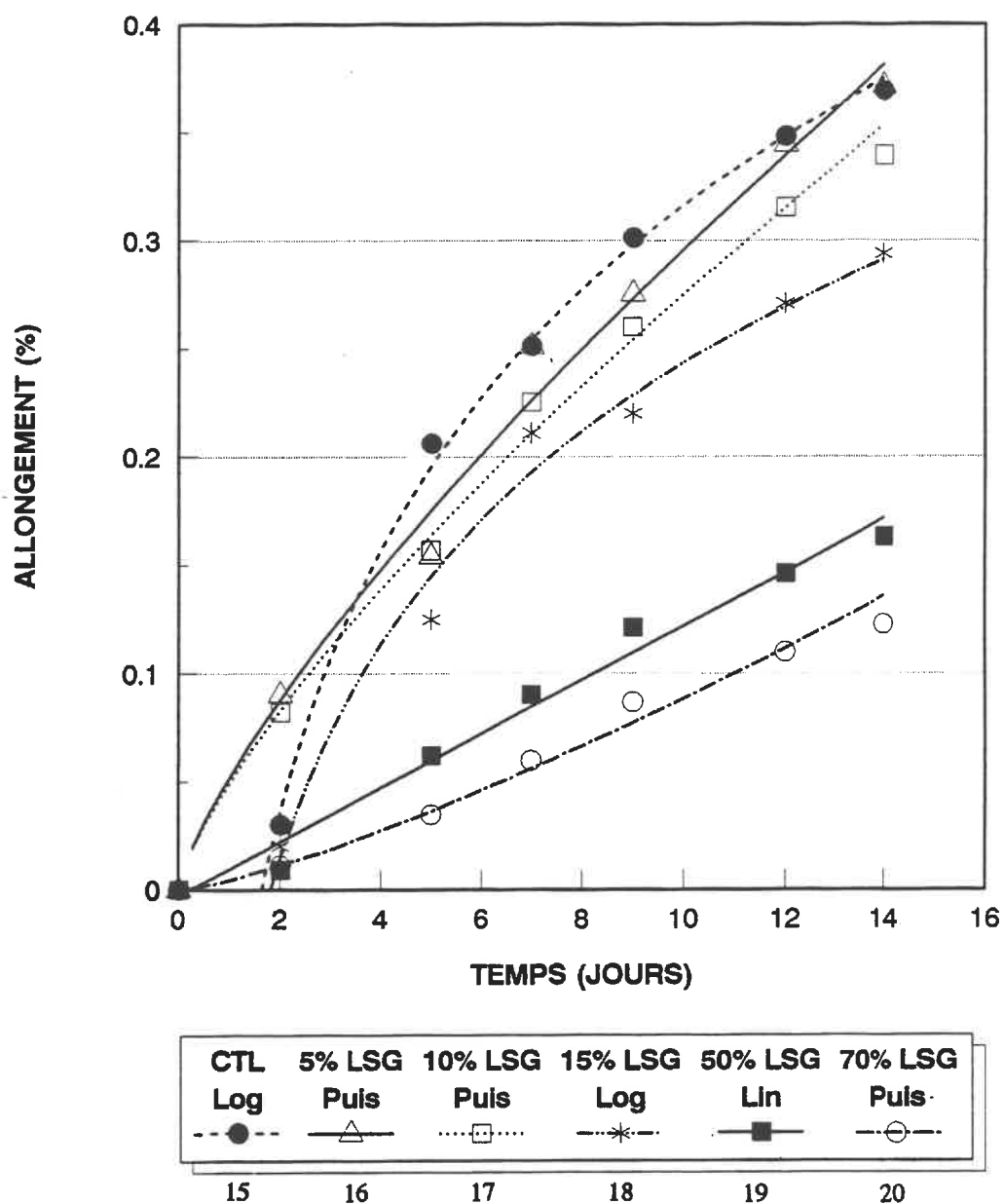


Fig. 31: Tendence des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.

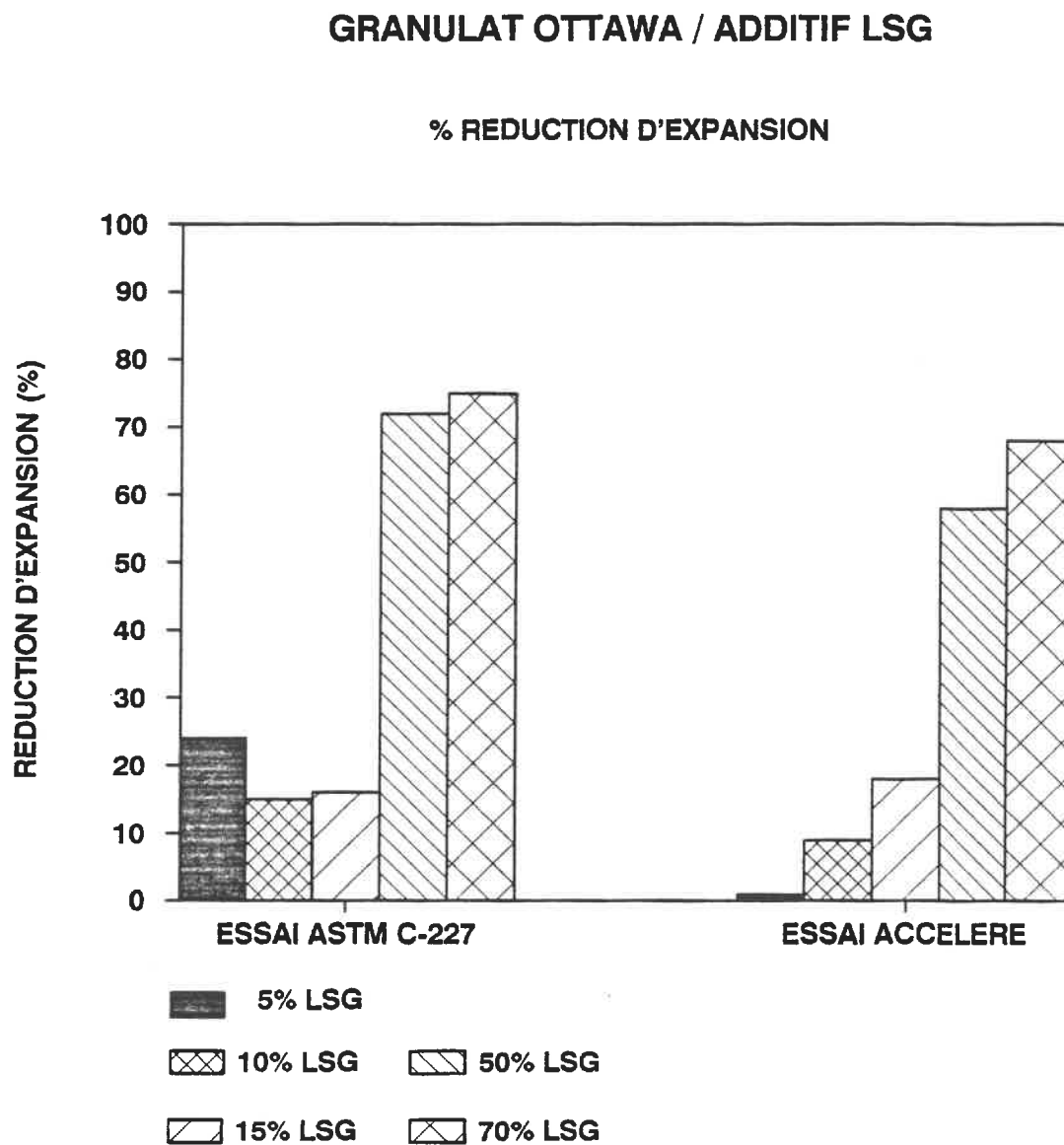


Fig. 32: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour le calcaire d'Ottawa.

7.2.3 Calcaire d'Ottawa versus Li_2CO_3

1- Les réductions d'expansion des barres de mortier confectionnées avec un remplacement de carbonate de lithium sont très importantes pour ce qui est de l'essai ASTM C227. Par contre, nous observons le phénomène inverse en ce qui concerne les résultats de l'essai accéléré (voir graphique des figures 33 et 34).

2- Pour l'essai ASTM C227 la tendance de la courbe d'expansion de l'échantillon de contrôle est linéaire mais devient nettement concave avec l'augmentation de la quantité de lithium dans les mélanges (voir graphique de la figure 35). On note un affaissement progressif des courbes avec l'augmentation du taux de remplacement en lithium.

Avec l'essai accéléré, l'augmentation du remplacement par le lithium est représenté par le graphique de la figure 36 et montre que les courbes sont concaves pour de faibles remplacements pour ensuite devenir linéaire pour des remplacements élevés. Dans ce cas, le profil des courbes est similaire pour les quatre mélanges.

3- Avec l'essai ASTM, les pourcentages de réduction obtenus sont plus grands que 35% mais, semblent se stabiliser vers 50% pour des niveaux de remplacement

de 1,0% et 1,5%. Nous observons le phénomène inverse en ce qui concerne les résultats de l'essai accéléré. En effet, l'ajout de carbonate de lithium aux mélanges soumis à la cure accélérée augmente les expansions par rapport à l'échantillon de contrôle traduisant ainsi une réactivité plus grande dans le mélange de mortier (réf. histogramme de la figure 37). On note que les augmentations des expansions sont tout de même proportionnelles au taux de remplacement. Nos résultats sont concordants à ceux obtenus par Durand, (1988) et McCoy, Caldwell, (1951).

4- L'utilisation de carbonate de lithium rend les mélanges de mortier légèrement plus friables au moment du démoulage. Les surfaces rugueuses et plus granuleuses donnent un aspect de "biscuit sec" aux barres de mortier. Cet effet est amplifié avec l'augmentation de l'addition de carbonate de lithium. Cette observation nous indique qu'il y a probablement une relation directe entre l'infiltration de la solution de soude et les fortes expansions mesurées. En effet, nous croyons que l'utilisation de carbonate de lithium augmente la perméabilité des échantillons. La sévérité de la cure accélérée et la teneur élevée en NaOH ne permet probablement pas le développement de l'action chimique du carbonate de lithium avant et pendant l'infiltration de la solution. L'attaque des granulats réactifs par la solution de soude serait alors plus rapide et plus importante. Par contre, la cure de l'essai ASTM C227, beaucoup plus "douce", permettrait le

développement de l'action chimique du carbonate de lithium expliquant ainsi les bons résultats observés.

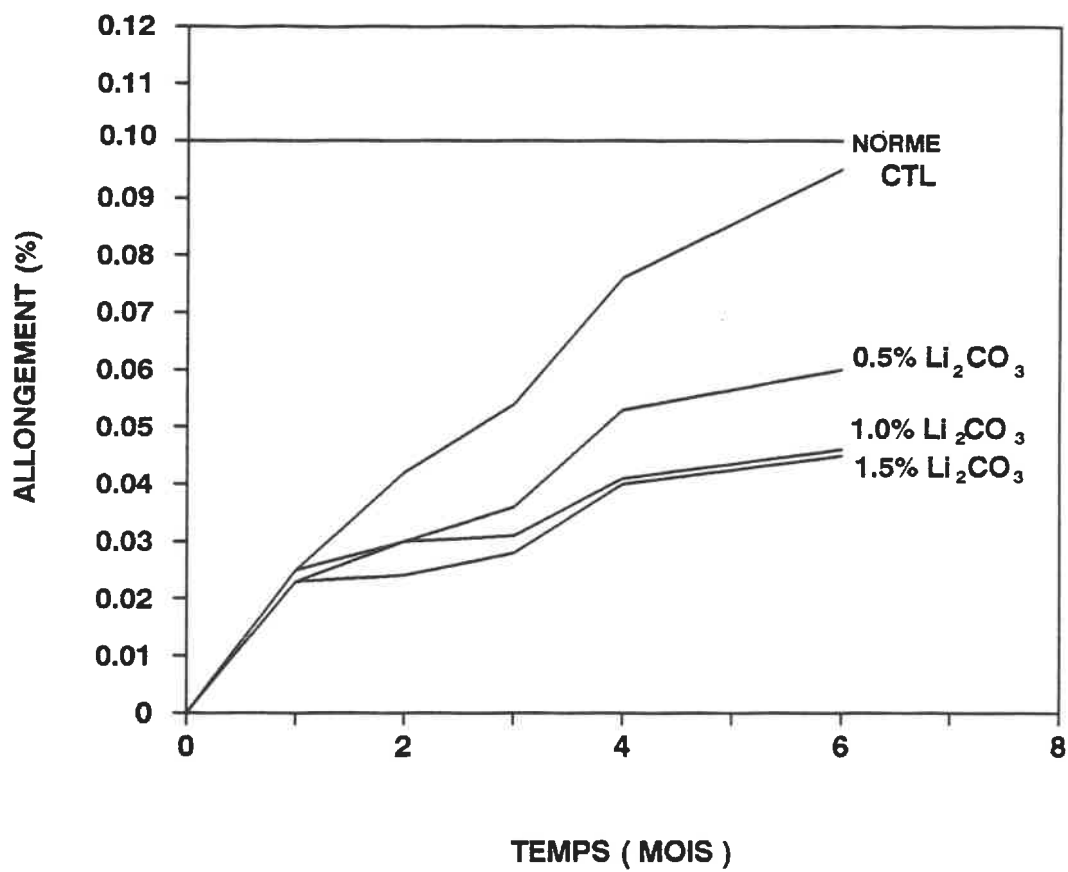
GRANULAT OTTAWA / ADDITIF Li_2CO_3 **ESSAI ASTM C-227**

Fig. 33: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats Ottawa et le carbonate de lithium pour l'essai ASTM.

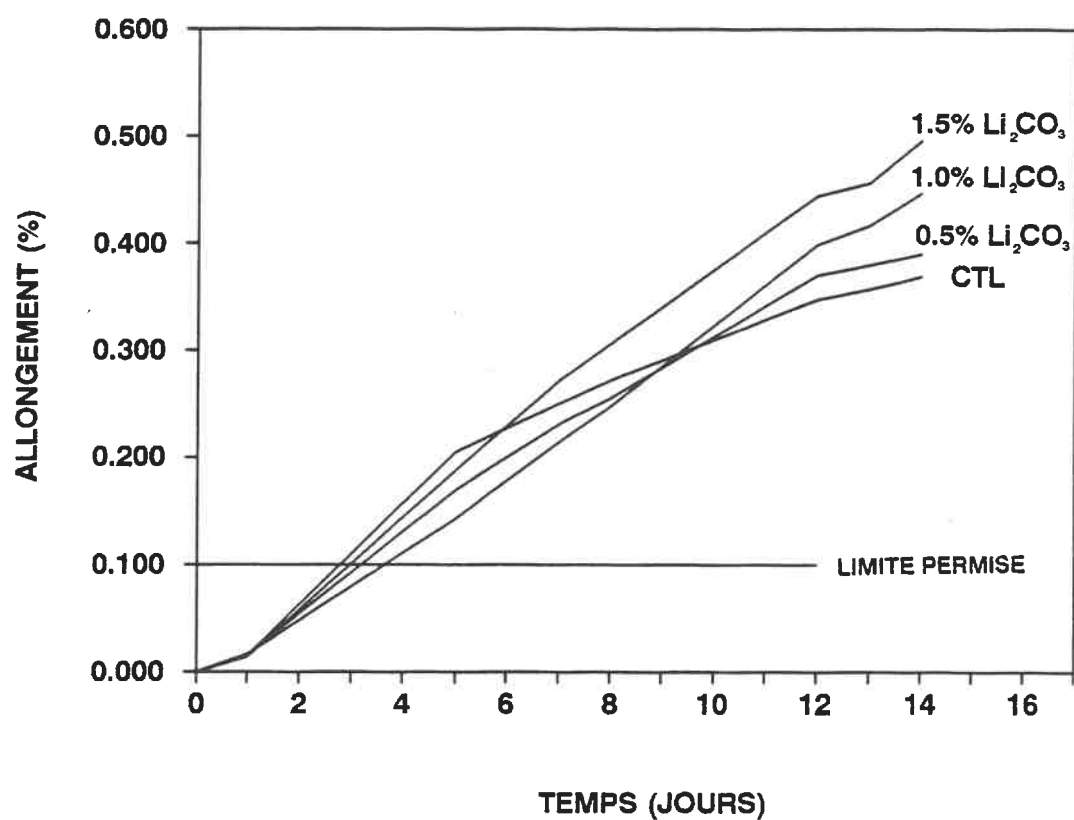
GRANULAT OTTAWA / ADDITIF Li_2CO_3 **ESSAI ACCELERE**

Fig. 34: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats Ottawa et le carbonate de lithium pour l'essai accéléré.

GRANULAT OTTAWA / ADDITIF Li_2CO_3
ESSAI ASTM C227
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

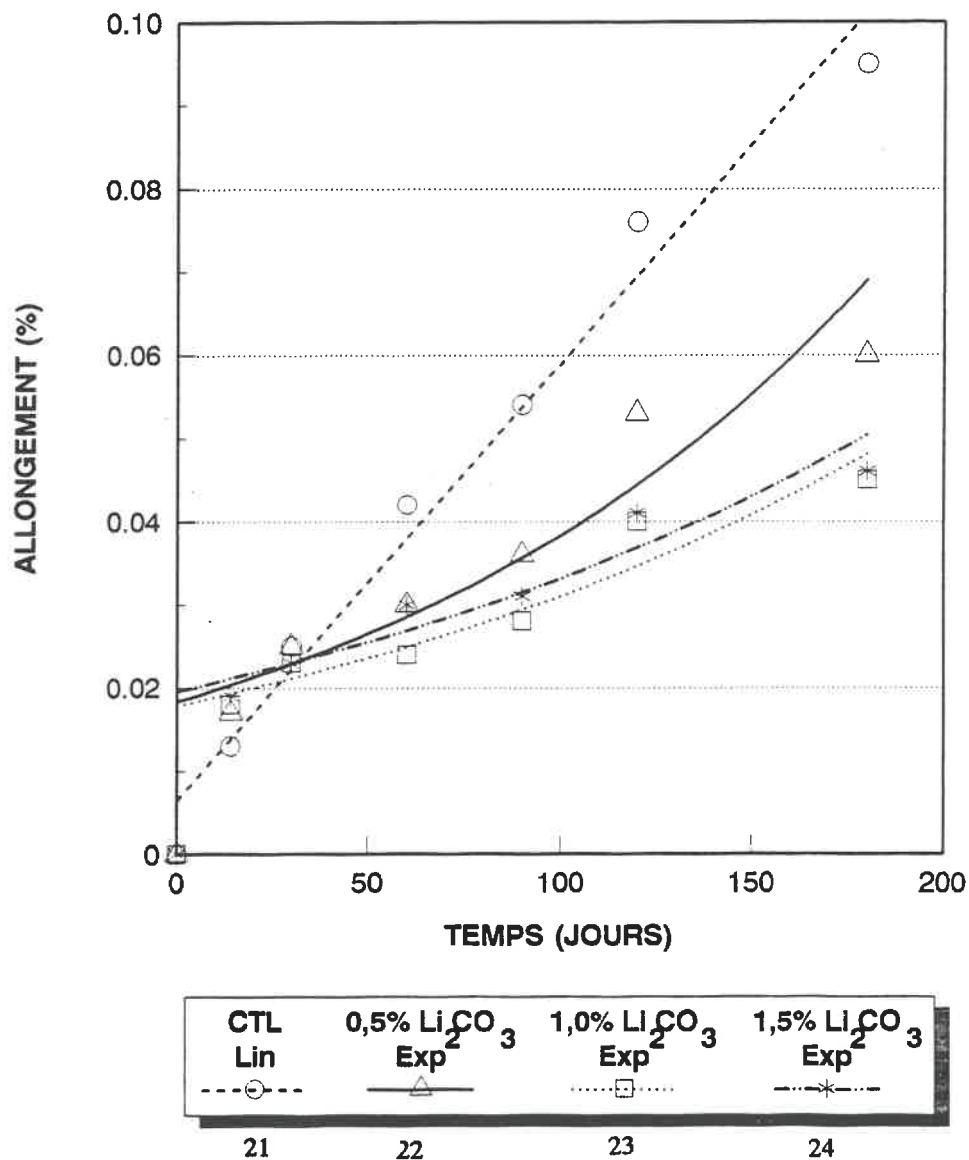


Fig. 35: Tendence des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de carbonate de lithium pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT OTTAWA / ADDITIF Li_2CO_3
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

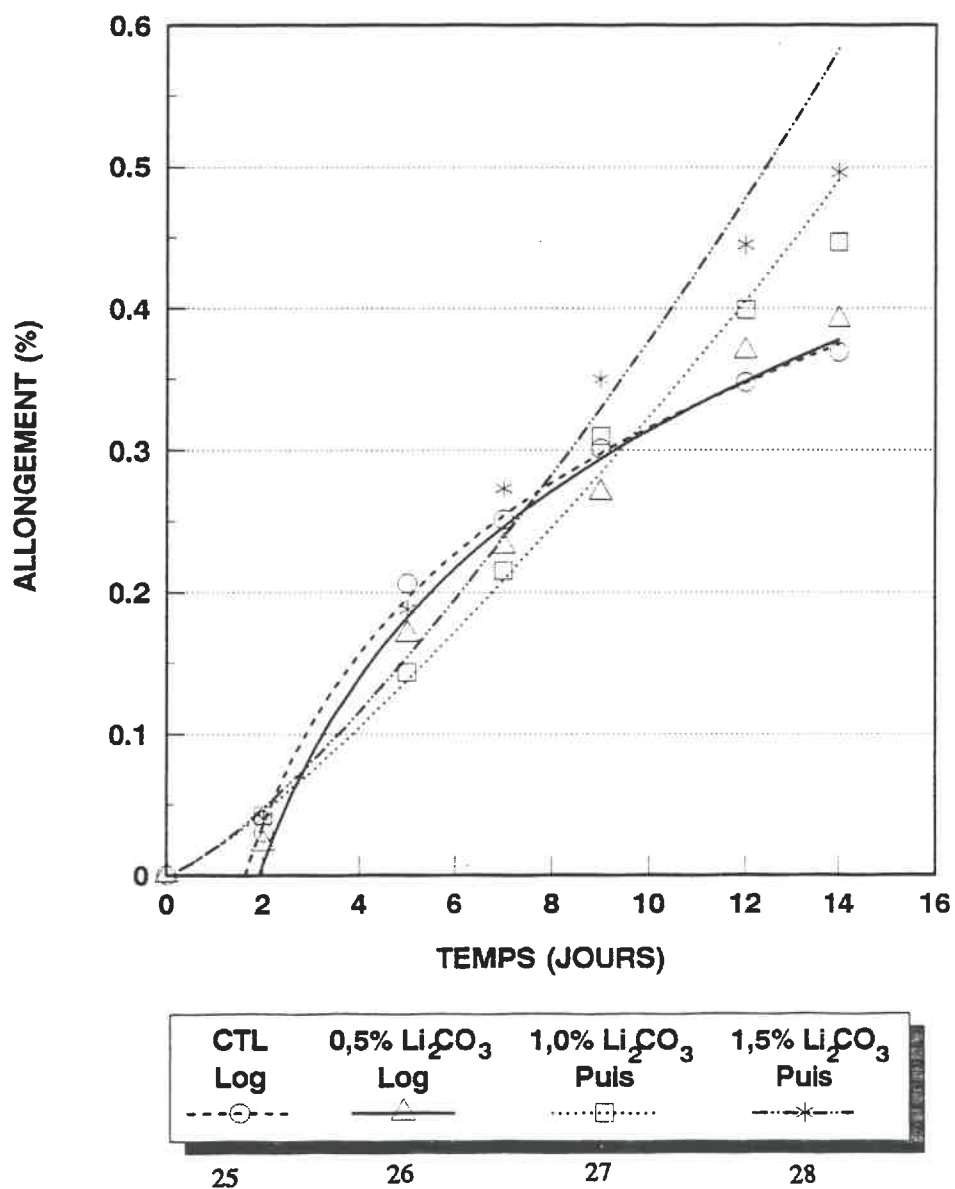


Fig. 36: Tendance des courbes d'expansion du calcaire d'Ottawa avec des remplacements de carbonate de lithium pour l'essai accéléré.

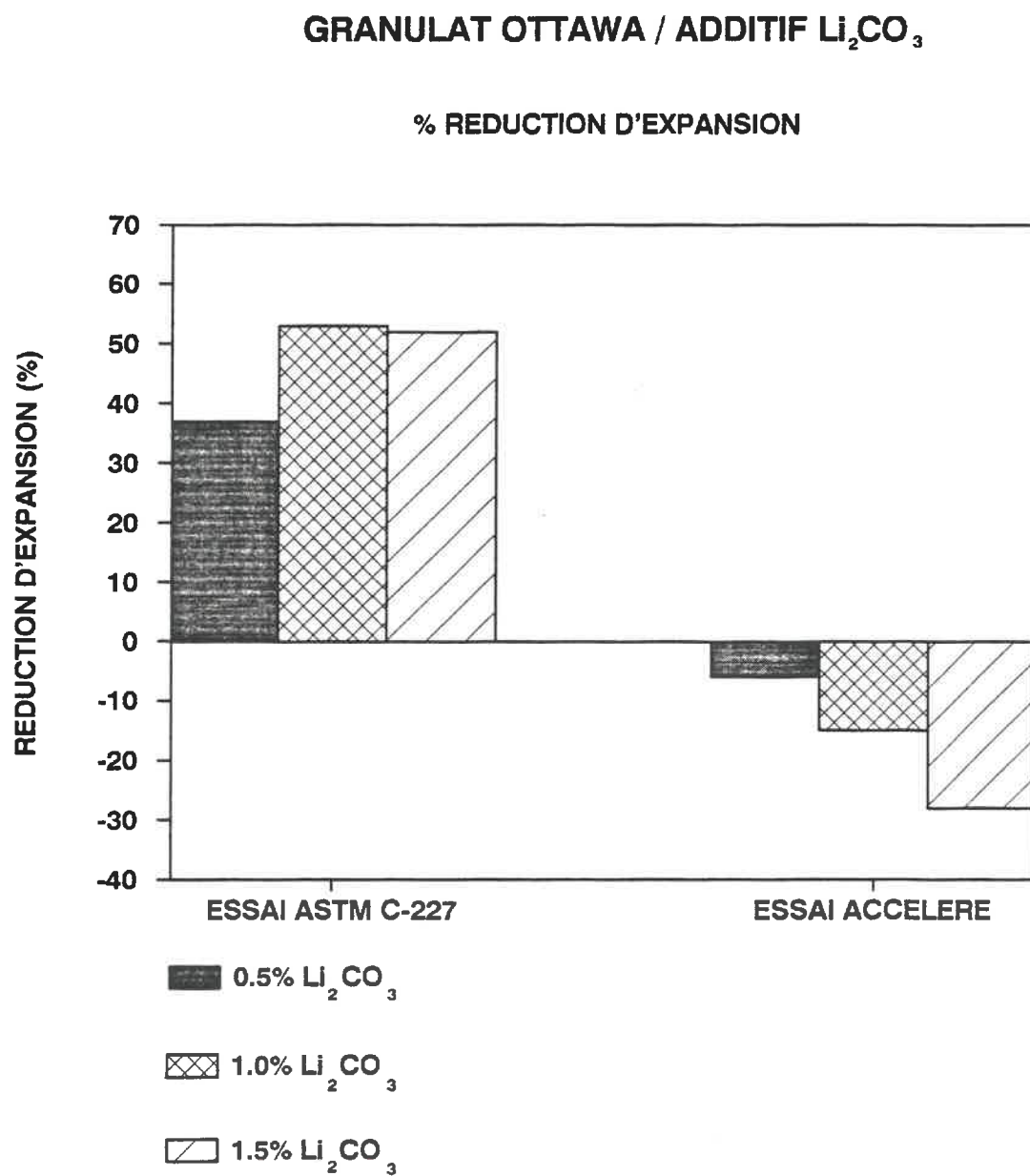


Fig. 37: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le carbonate de lithium pour le calcaire d'Ottawa.

7.3 TUF RHYOLITIQUE DE BEAUCEVILLE

Les barres de mortier confectionnées avec le tuf de Beauceville ont été soumises à la cure accélérée et à la cure de l'essai ASTM C227. Aux mélanges de mortier, nous avons ajouté de la fumée de silice condensée et le laitier silicaté granulé. Les niveaux de remplacement de 5%, 10% et 15% furent retenus pour la fumée de silice. Des remplacements de 10%, 15% et 50% ont été effectués avec l'utilisation du laitier.

7.3.1 Tuf rhyolitique versus FSC

1- L'utilisation de la fumée de silice a réduit de façon significative les expansions des barres de mortier soumises aux deux essais comme on peut l'observer sur le graphique des figures 38 et 39.

2- La tendance des courbes d'expansion de FSC est illustrée sur le graphique de la figure 40 pour l'essai ASTM C227. La courbe de l'échantillon contrôle est légèrement convexe mais avec l'ajout de FSC les courbes deviennent progressivement concaves. On note que les courbes de 10% et 15% de FSC sont identiques sauf que l'ordonnée à l'origine est moins grande pour 15% de remplacement de FSC.

Le profil des courbes de l'essai accéléré est sensiblement différent tel qu'illustré sur le graphique de la figure 41. Les courbes ne deviennent pas concaves mais demeurent linéaires. Pour les deux essais, les courbes fléchissent progressivement avec l'augmentation de l'ajout de FSC.

3- Les réductions d'expansions sont proportionnelles aux taux de remplacement pour l'essai accéléré. Par contre, selon les résultats obtenus avec l'essai normalisé, un remplacement de 5% de FSC se traduit par une augmentation de l'allongement par rapport à l'échantillon contrôle (réf. histogramme de la figure 42). La relation entre les réductions d'expansion et les pourcentages de remplacement de FSC concernant l'essai ASTM C227 semble plus ou moins linéaire. Par contre, le taux de réduction d'expansion observé pour l'essai accéléré semble indiquer que la relation entre ces mêmes variables est linéaire. L'effet pouzzolanique de la FSC escompté d'après les hypothèses de départ semble mieux transparaître avec l'essai accéléré.

4- L'essai normalisé ASTM C227 ne détecte pas la réactivité du tuf utilisé sans additif. Dans le cas de l'essai accéléré, seul un remplacement de plus de 15% de FSC rend le granulat non réactif par rapport à la limite fixée.

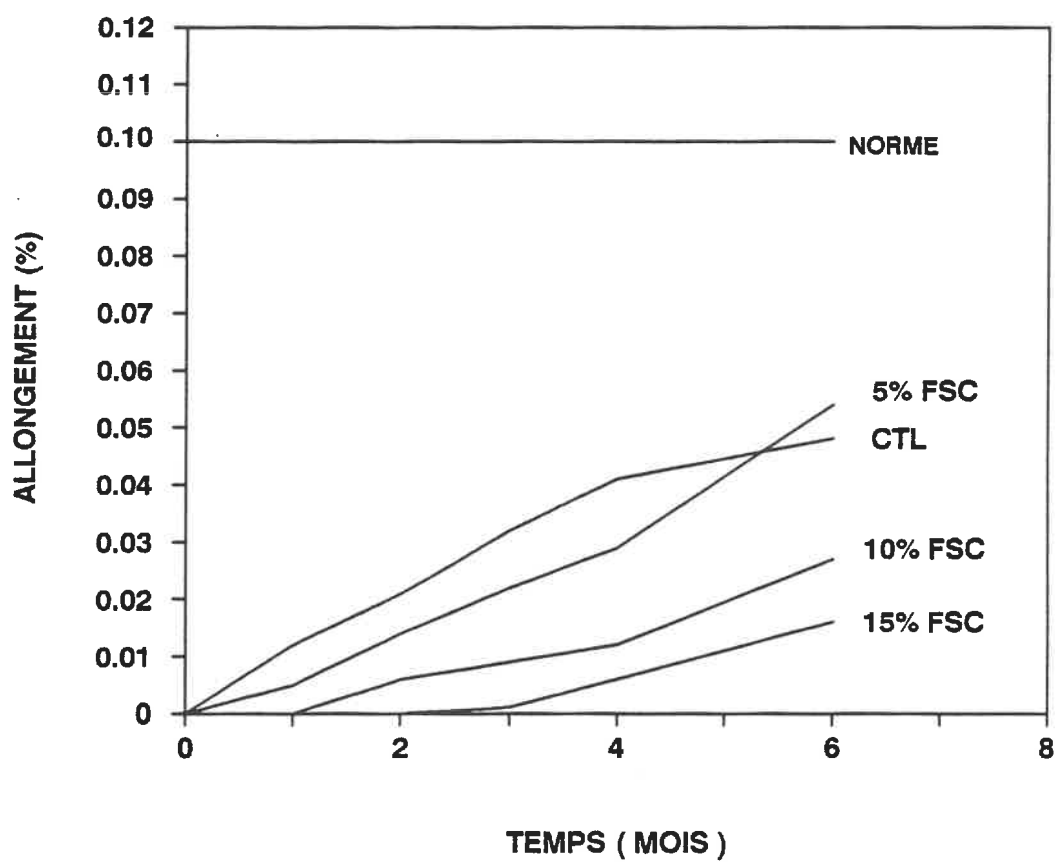
GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF FSC**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 38: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Beauceville et la fumée de silice condensée pour l'essai ASTM.

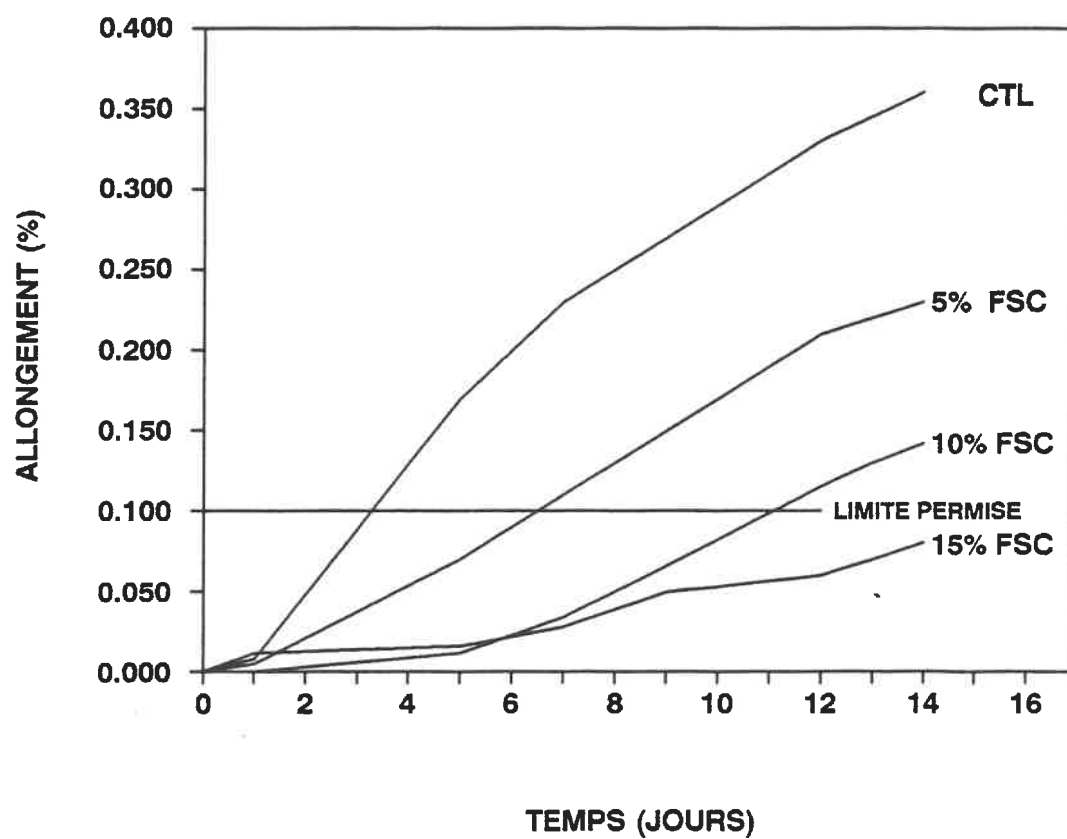
GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF FSC**ESSAI ACCELERE**

Fig. 39: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Beauceville et la fumée de silice condensée pour l'essai accéléré.

GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF FSC
ESSAI ASTM C227
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

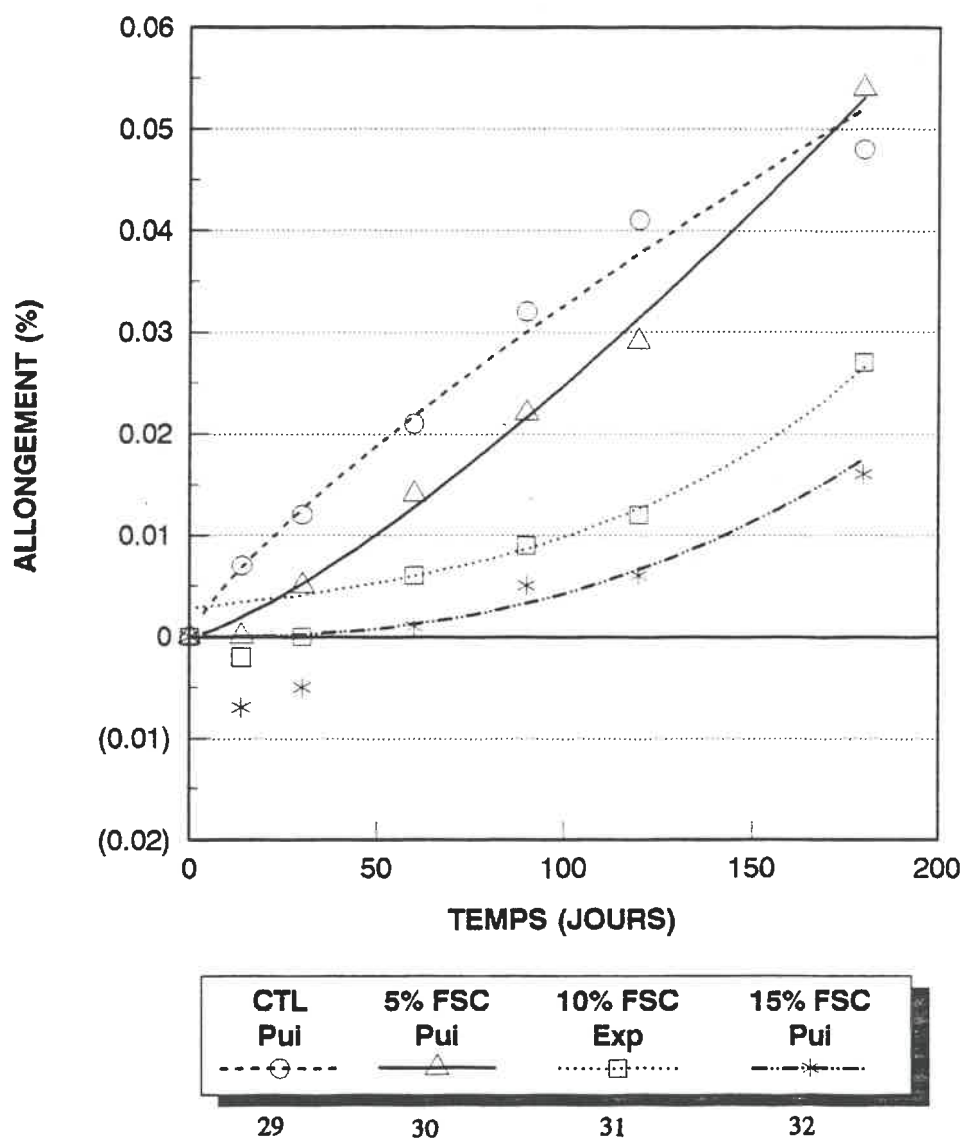


Fig. 40: Tendence des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT BEUCEVILLE / ADDITIF FSC
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

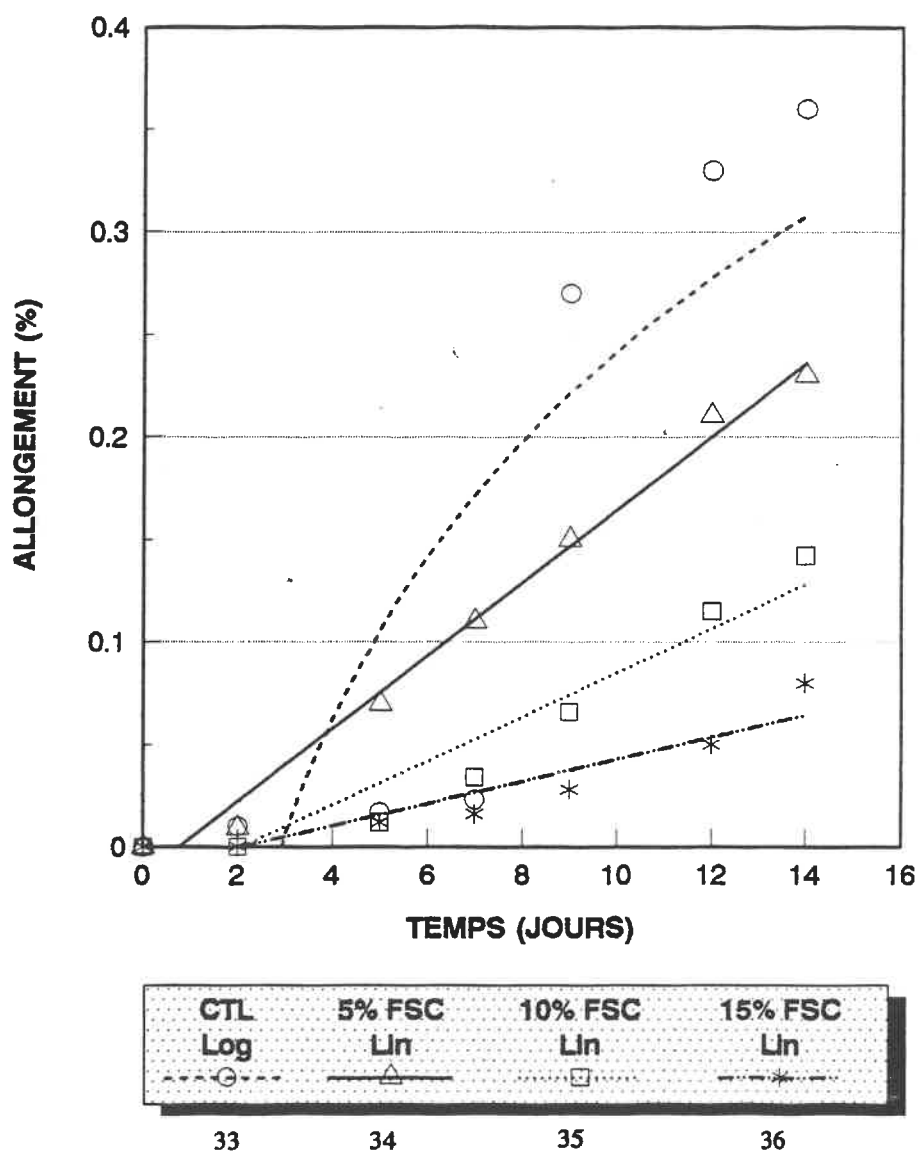


Fig. 41: Tendence des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.

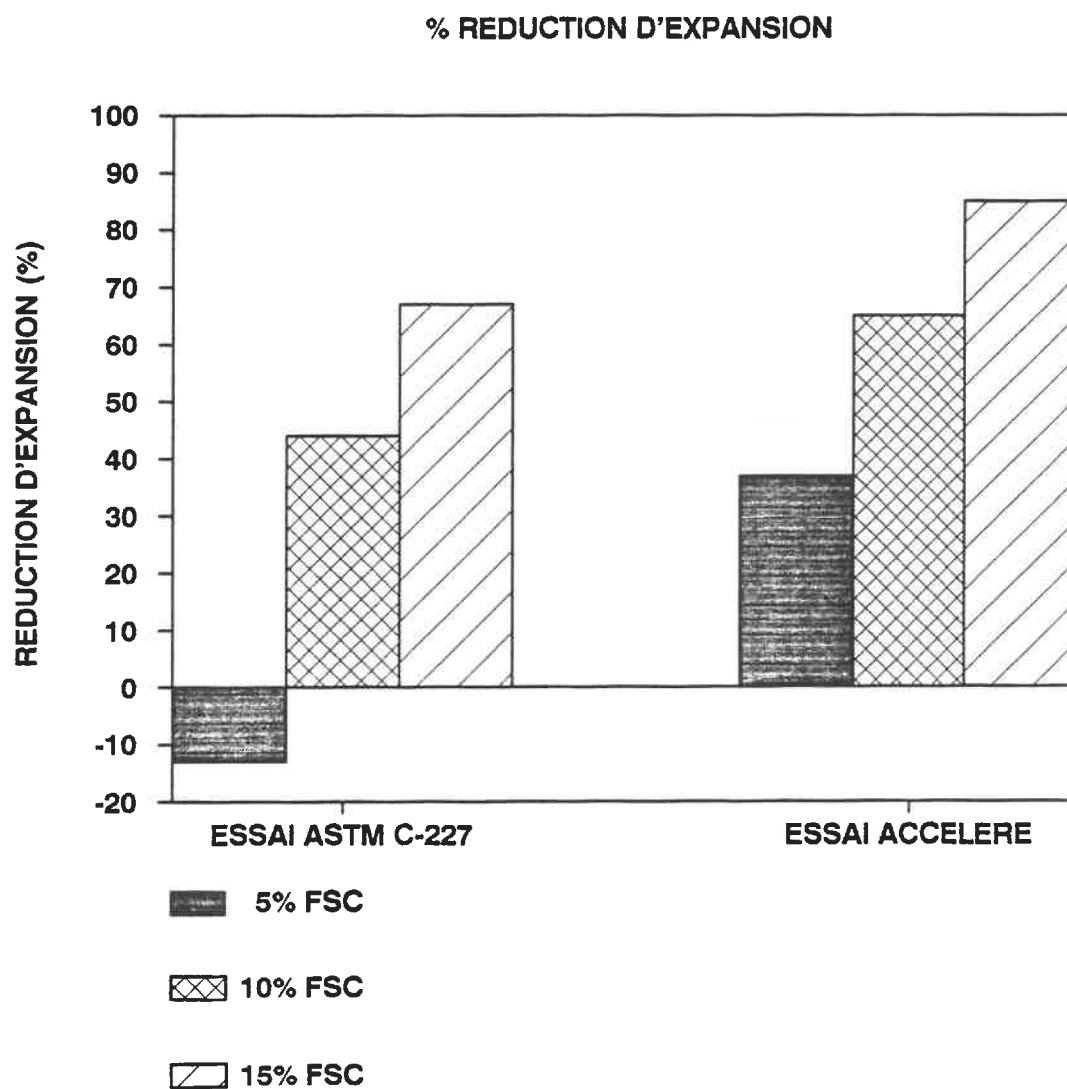
GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF FSC

Fig. 42: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice condensée pour le tuf de Beauceville.

7.3.2 Tuf rhyolitique versus LSG

1- Comme la fumée de silice, le laitier diminue de façon proportionnelle les allongements des barres soumises à l'essai accéléré. Par contre, les résultats obtenus avec l'essai normalisé ne sont pas concordants avec les hypothèses: il semble qu'un remplacement de 15% rend l'échantillon plus expansif que l'échantillon de contrôle...Quant aux remplacements de l'ordre de 10% et de 50% ils produisent des réductions attendues (voir graphique des figures 43 et 44).

2- Les tendances des courbes d'expansion sont très similaires avec l'utilisation de LSG pour les deux essais. On note dans les deux cas que la forme des courbes est convexe. Par contre, une courbure légèrement plus prononcée est observée pour l'essai accéléré comme le démontre le graphique des figures 45 et 46. Les courbes fléchissent progressivement avec l'augmentation de l'ajout de LSG dans les mélanges.

3- L'histogramme de la figure 47 illustre les réductions obtenues aux termes des deux essais. Pour l'essai ASTM C227 l'efficacité du LSG n'est pas toujours conforme aux attentes: on note une réduction d'expansion négative pour un remplacement de 15%. D'un autre côté, les réductions d'expansion de l'essai accéléré sont plus cohérentes. Encore une fois, la cure de l'essai accéléré ne

semble pas influencer l'efficacité pouzzolanique du laitier.

4- L'essai ASTM C227 ne détecte pas la réactivité du tuf. Donc, selon cet essai l'ajout de LSG n'est pas nécessaire. Par contre, pour l'essai accéléré, un remplacement de 50% de LSG ne suffit pas à diminuer la réactivité du tuf à un niveau "acceptable", i.e. sous la limite fixée.

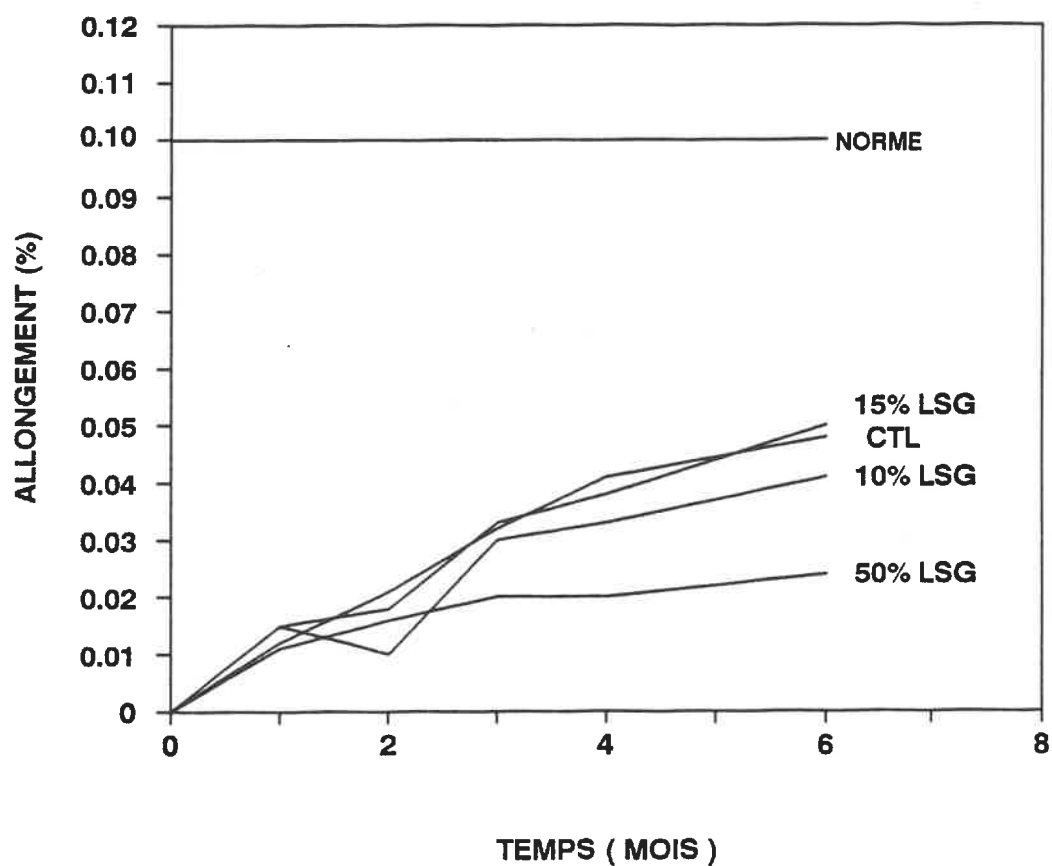
GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF LSG**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 43: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Beauceville et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.

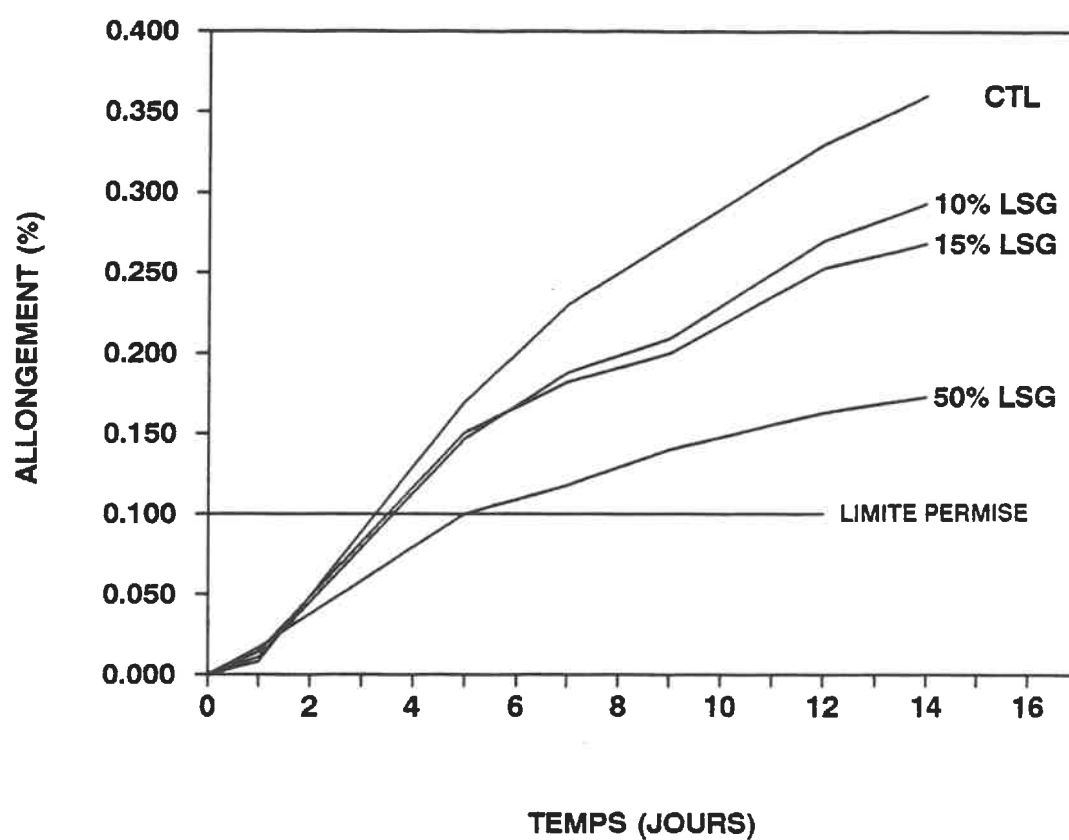
GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF LSG**ESSAI ACCELERE**

Fig. 44: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Beauceville et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.

GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF LSG
ESSAI ASTM C227
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

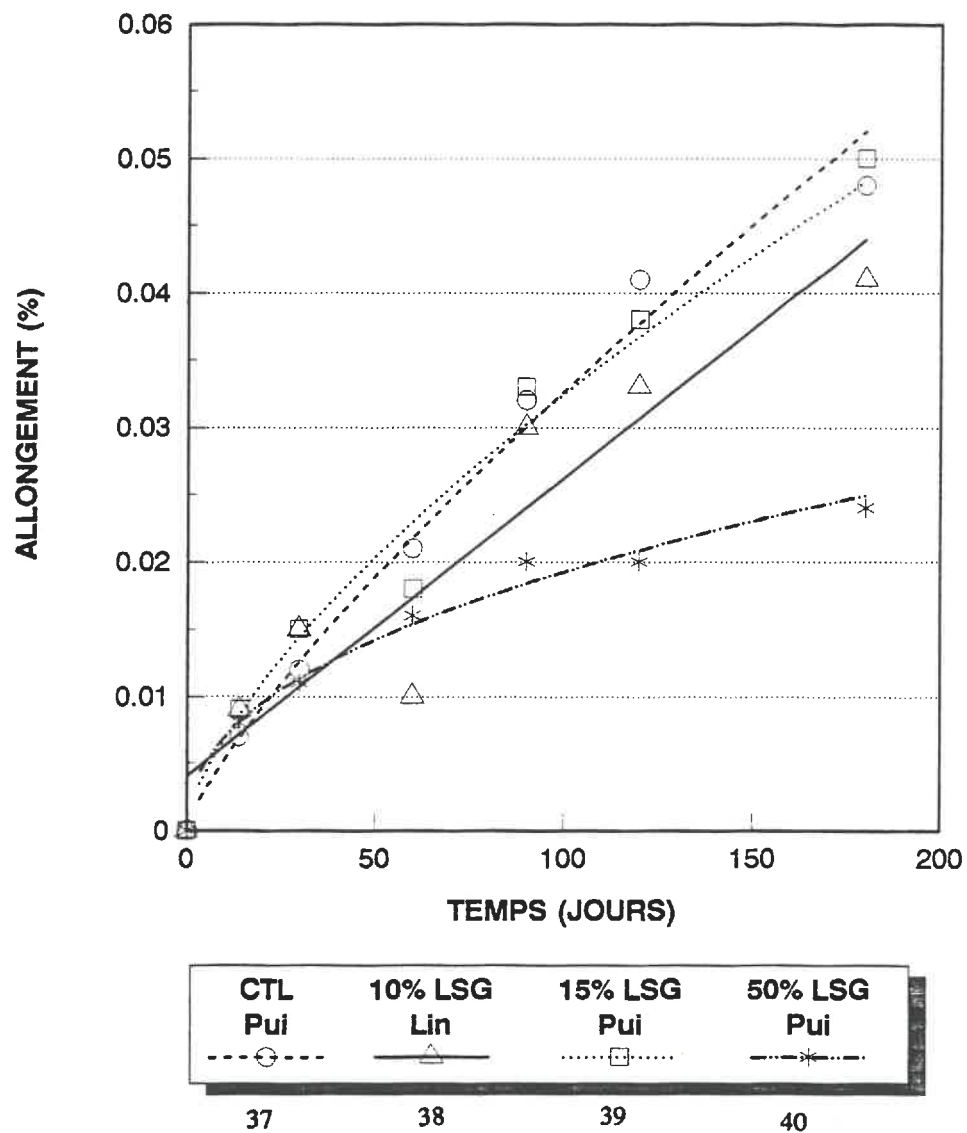


Fig. 45: Tendence des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF LSG
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

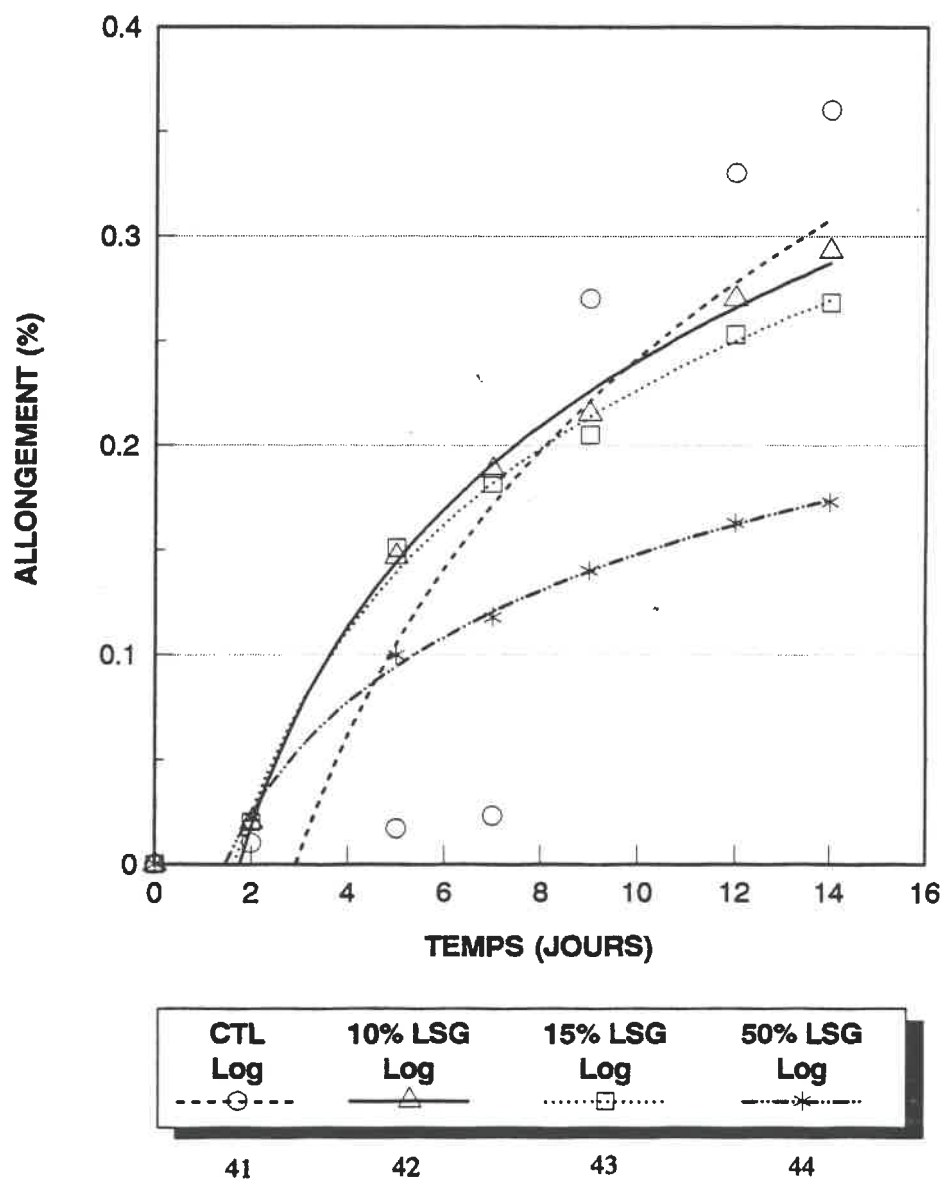


Fig. 46: Tendence des courbes d'expansion du tuf de Beauceville avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.

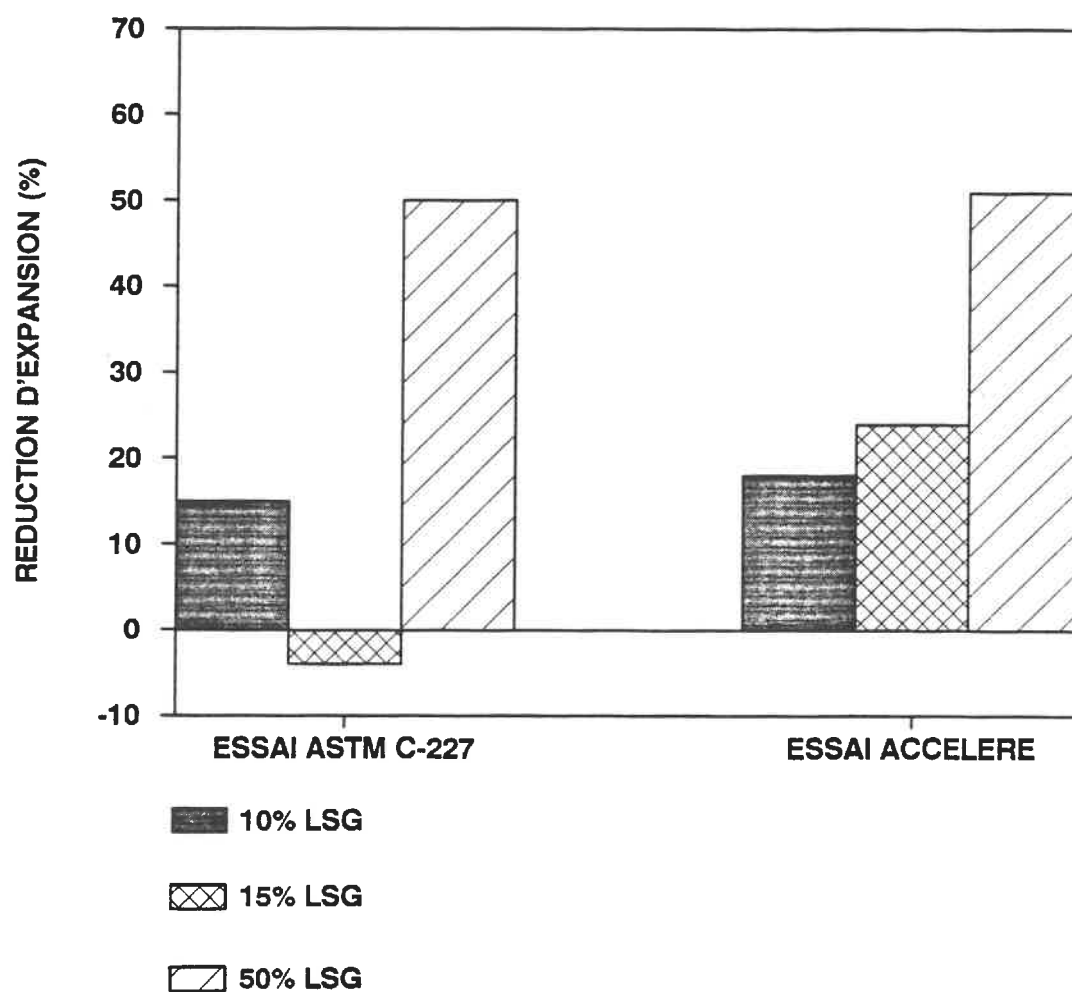
GRANULAT BEAUCEVILLE / ADDITIF LSG**% REDUCTION D'EXPANSION**

Fig. 47: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour le tuf de Beauceville.

7.4 SCHISTE CHLORITEUX DE SHERBROOKE

Comme pour le tuf de Beauceville, le schiste de Sherbrooke fut soumis aux deux essais sous des remplacements de 5%, 10% et 15% pour la fumée de silice et de 10%, 15% et 50% pour le laitier.

7.4.1 Schiste de Sherbrooke versus FSC

1- Encore une fois, l'essai ASTM C227 n'a pas détecté la réactivité de l'échantillon de contrôle. Pourtant, ce granulats est reconnu réactif dans les structures de béton (Grattan-Bellew, 1982) ainsi que par d'autres essais (Blanchette, 1989 et Durand, 1988). On peut observer les résultats obtenus sur le graphique des figures 48 et 49.

2- Pour l'essai ASTM C227, la tendance des courbes d'expansion est initialement linéaire pour ensuite devenir convexe avec 5% et 10% de remplacement. La courbe est légèrement concave pour ce qui est d'un remplacement de 15%. Le profil des courbes d'expansion pour l'essai accéléré est linéaire quelque soit le pourcentage de remplacement de FSC. Un abaissement des courbes est notée avec l'augmentation de la quantité de FSC pour les deux essais (voir graphique des figures 50 et 51).

3- Les réductions d'expansion sont proportionnelles aux pourcentages de remplacement de FSC tel qu'indiqué par l'histogramme de la figure 52, et ce pour les deux essais.

4- L'essai accéléré semble avoir détecté justement la réactivité du granulat. Ainsi, il semble qu'un remplacement de 10% et plus soit nécessaire pour rendre le granulat non réactif. Les réductions d'expansion obtenues avec l'essai accéléré sont proportionnelles aux taux de remplacement de FSC et sont plus significatives que pour l'essai normalisé. Concernant le taux de réactivité du tuf pour l'essai ASTM, l'ajout de FSC n'est pas requis.

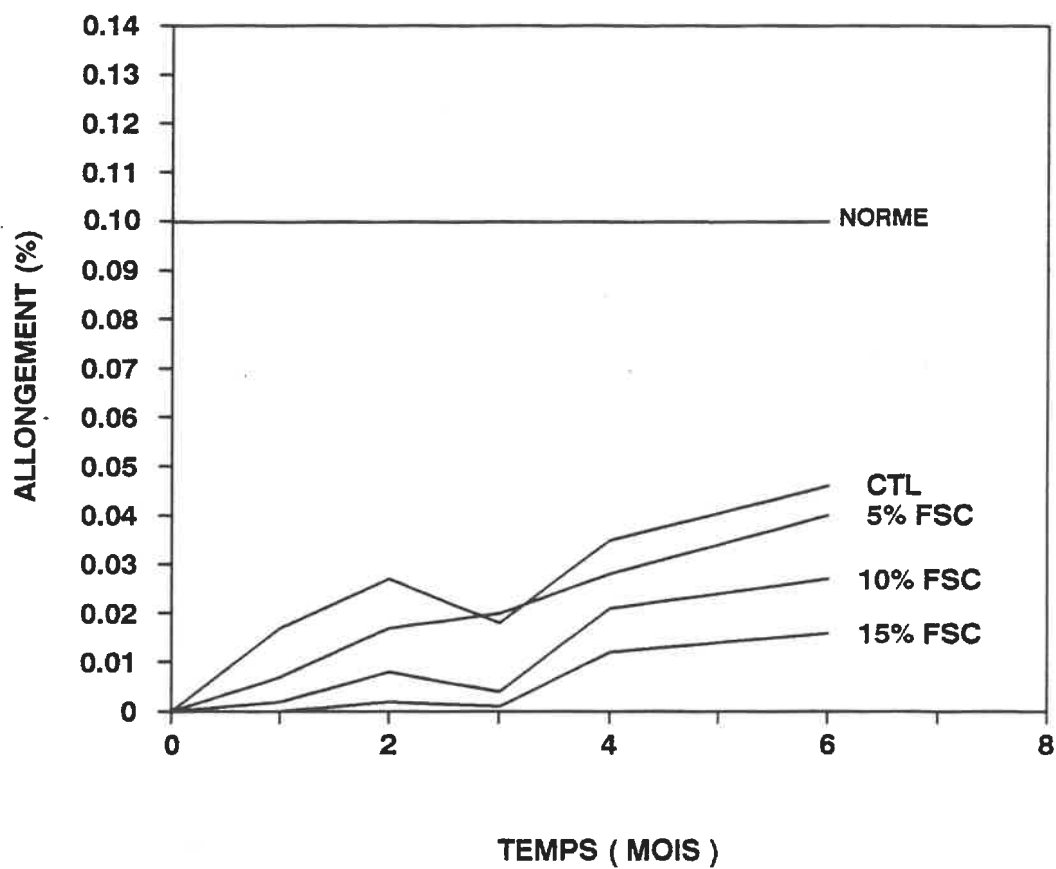
GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF FSC**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 48: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Sherbrooke et la fumée de silice pour l'essai ASTM.

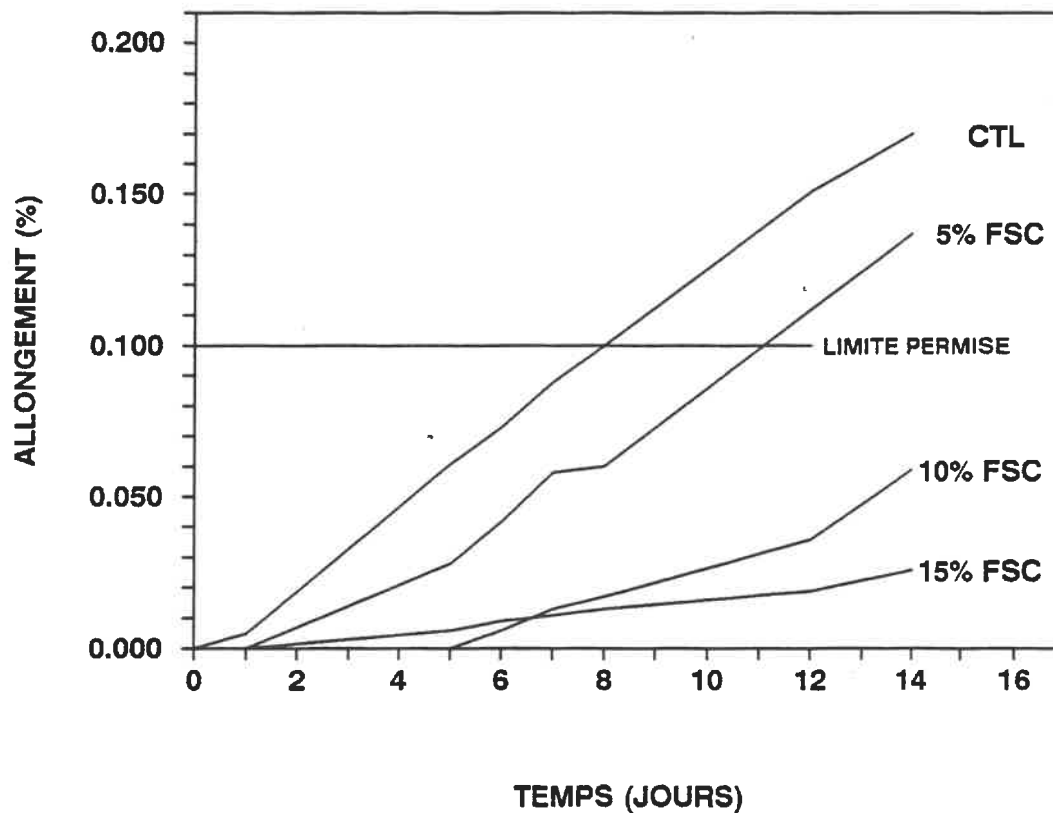
GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF FSC**ESSAI ACCELERE**

Fig. 49: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Sherbrooke et la fumée de silice pour l'essai accéléré.

GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF FSC

ESSAI ASTM C227

TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

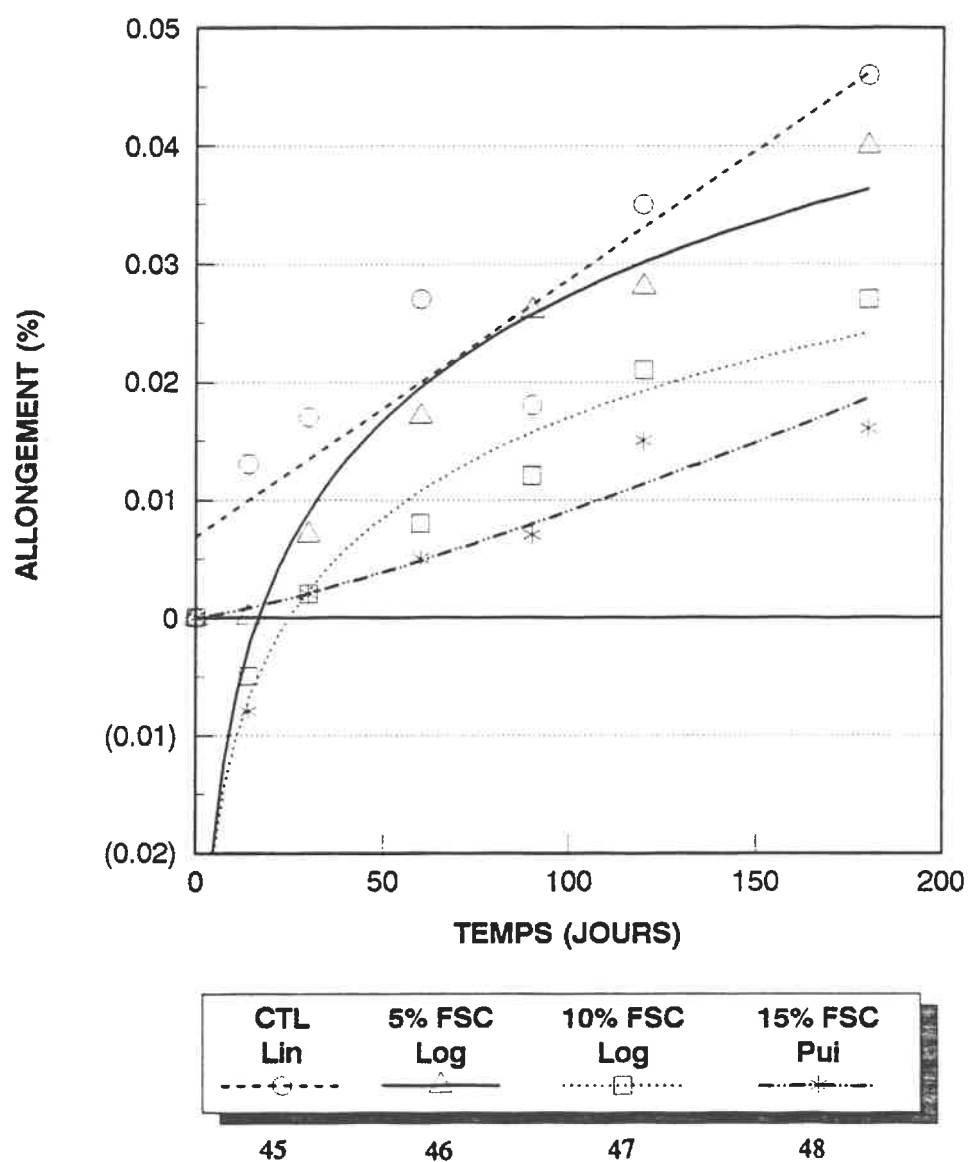


Fig. 50: Tendance des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de FSC pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF FSC
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

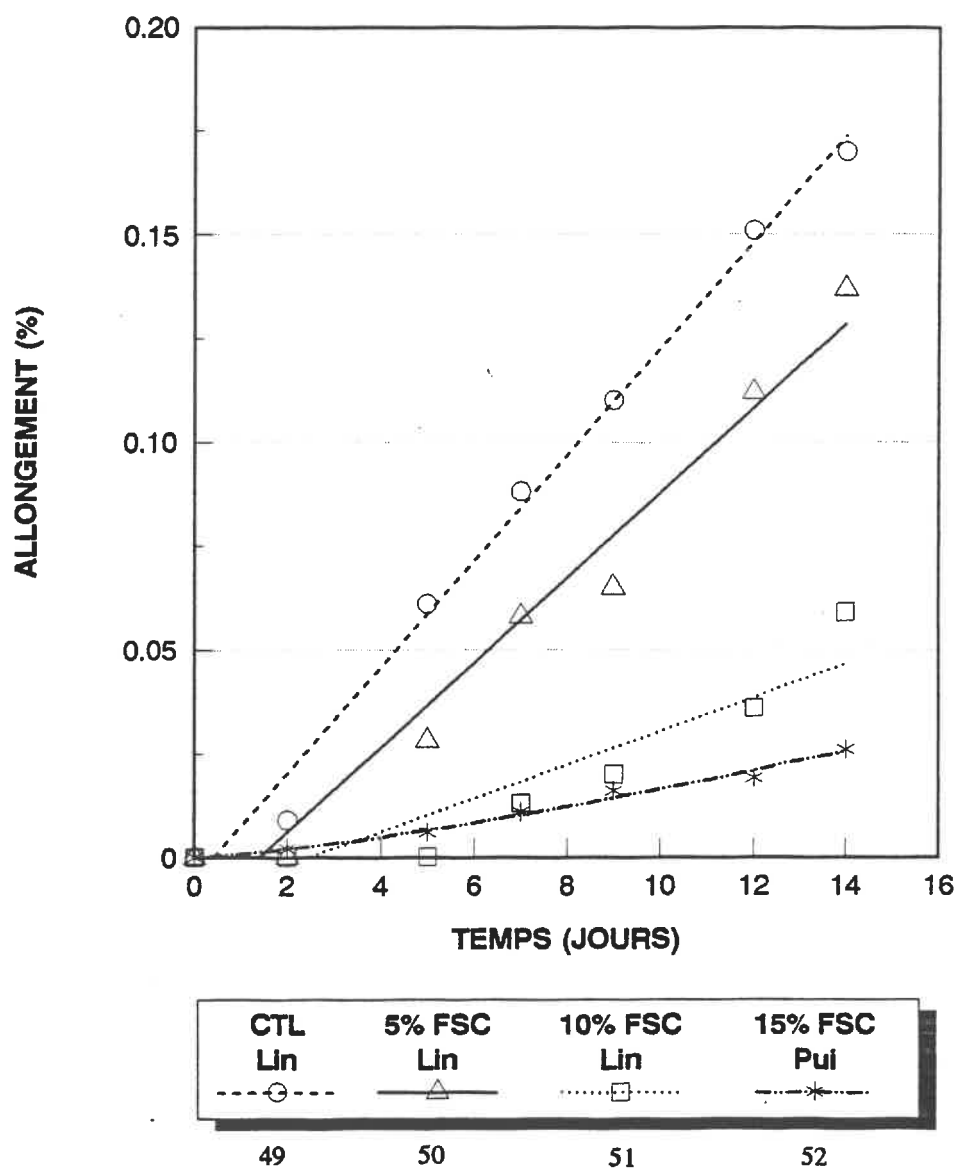


Fig. 51: Tendence des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de FSC pour l'essai accéléré.

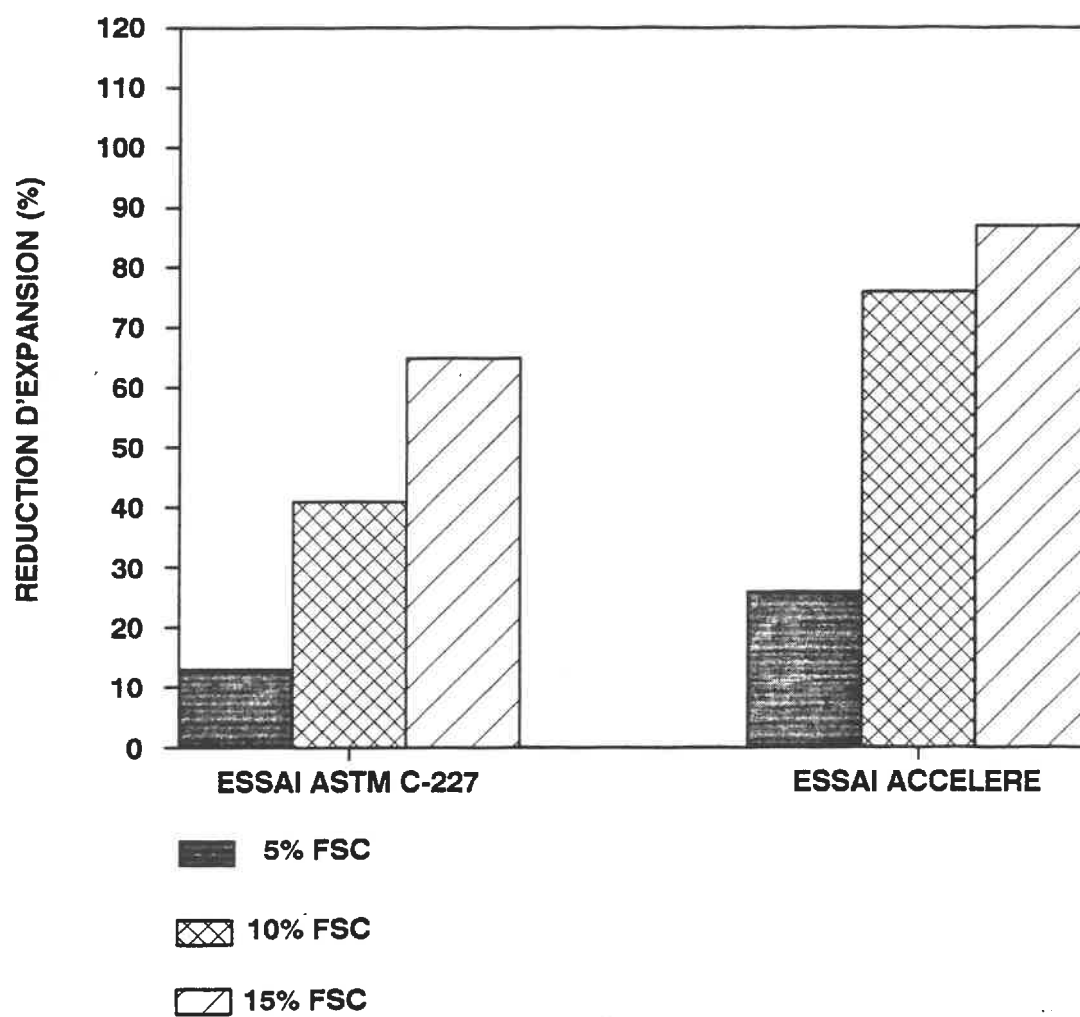
GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF FSC**% REDUCTION D'EXPANSION**

Fig. 52: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice condensée pour le schiste de Sherbrooke.

7.4.2 Schiste de Sherbrooke versus LSG

1- Pour les deux essais, il semble que seul un remplacement de 50% de LSG réduit de façon significative les expansions des barres de mortier. On note que des réductions d'expansion similaires sont obtenues avec des remplacements de 10% et 15% pour l'essai normalisé. Par contre, un remplacement de 10% de LSG correspond à une expansion légèrement supérieure à l'échantillon contrôle pour l'essai accéléré (voir le graphique de la figure 54).

2- Comme pour l'utilisation de FSC, la tendance des courbes d'expansion est de forme convexe pour l'essai ASTM et linéaire pour l'essai accéléré. Les courbes fléchissent graduellement en proportion de la quantité de LSG comme l'indique le graphique des figures 55 et 56.

3- L'histogramme de la figure 57 illustre les réductions observées à la fin des essais. Malgré l'irrégularité notée pour un remplacement de 10% de LSG, la cure de l'essai accéléré ne semble pas affecter de façon significative l'activité pouzzolanique du laitier puisque l'effet reste proportionnel à la quantité de LSG. Par contre, les réductions d'expansion sont plus "aléatoires" pour ce qui est de l'essai ASTM C227.

4- On note qu'un pourcentage de remplacement de 50% de LSG est nécessaire pour réduire la réactivité du granulat avec l'essai accéléré. L'ajout de LSG n'est pas nécessaire selon l'essai ASTM C227.

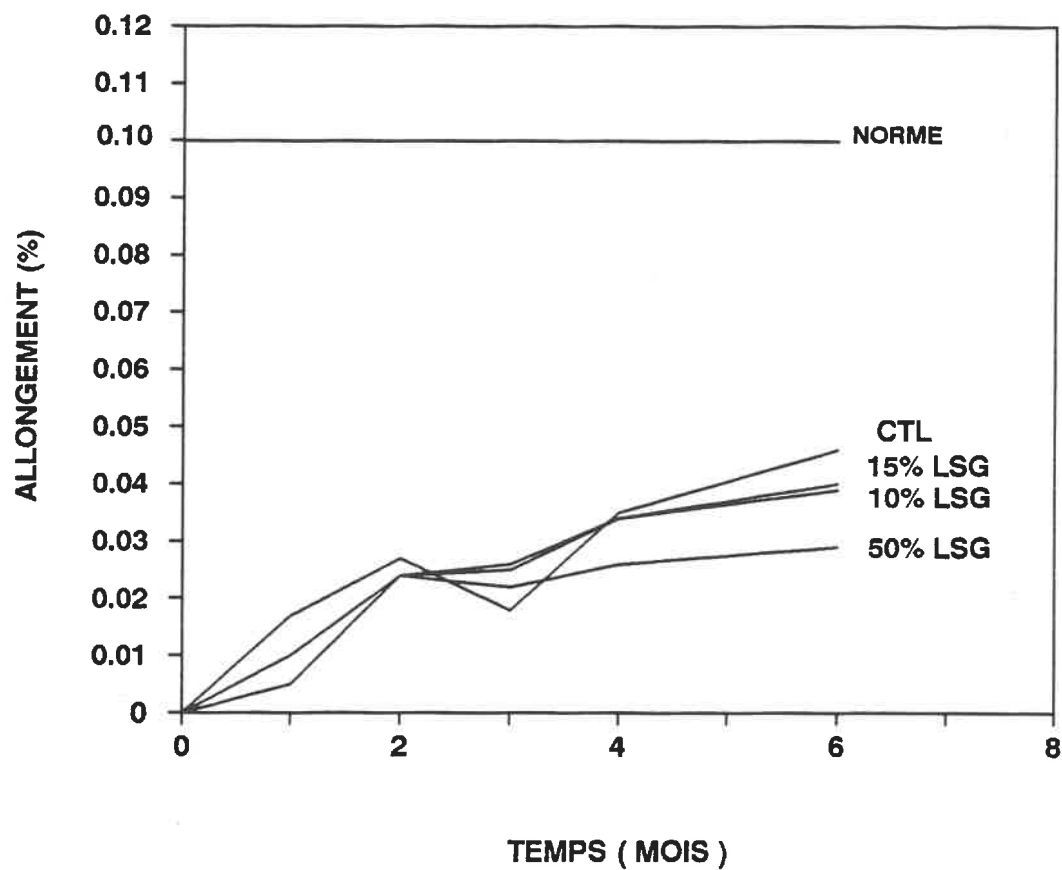
GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF LSG**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 53: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Sherbrooke et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.

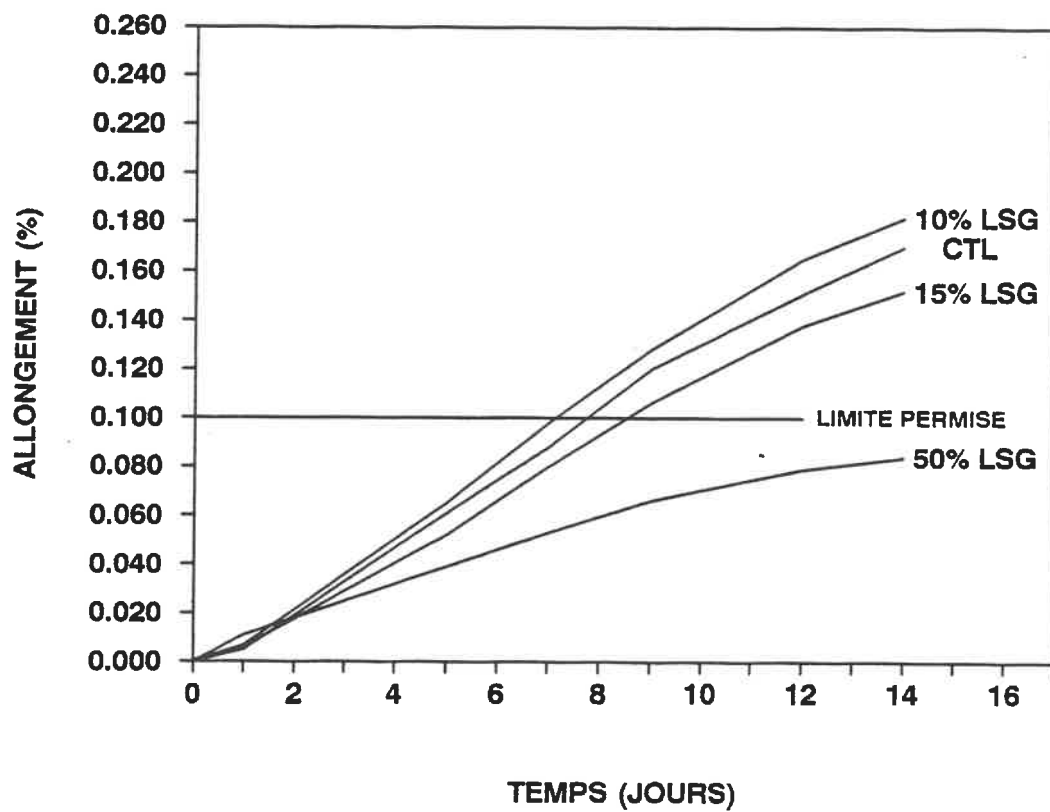
GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF LSG**ESSAI ACCELERE**

Fig. 54: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Sherbrooke et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.

GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF LSG

ESSAI ASTM C227

TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

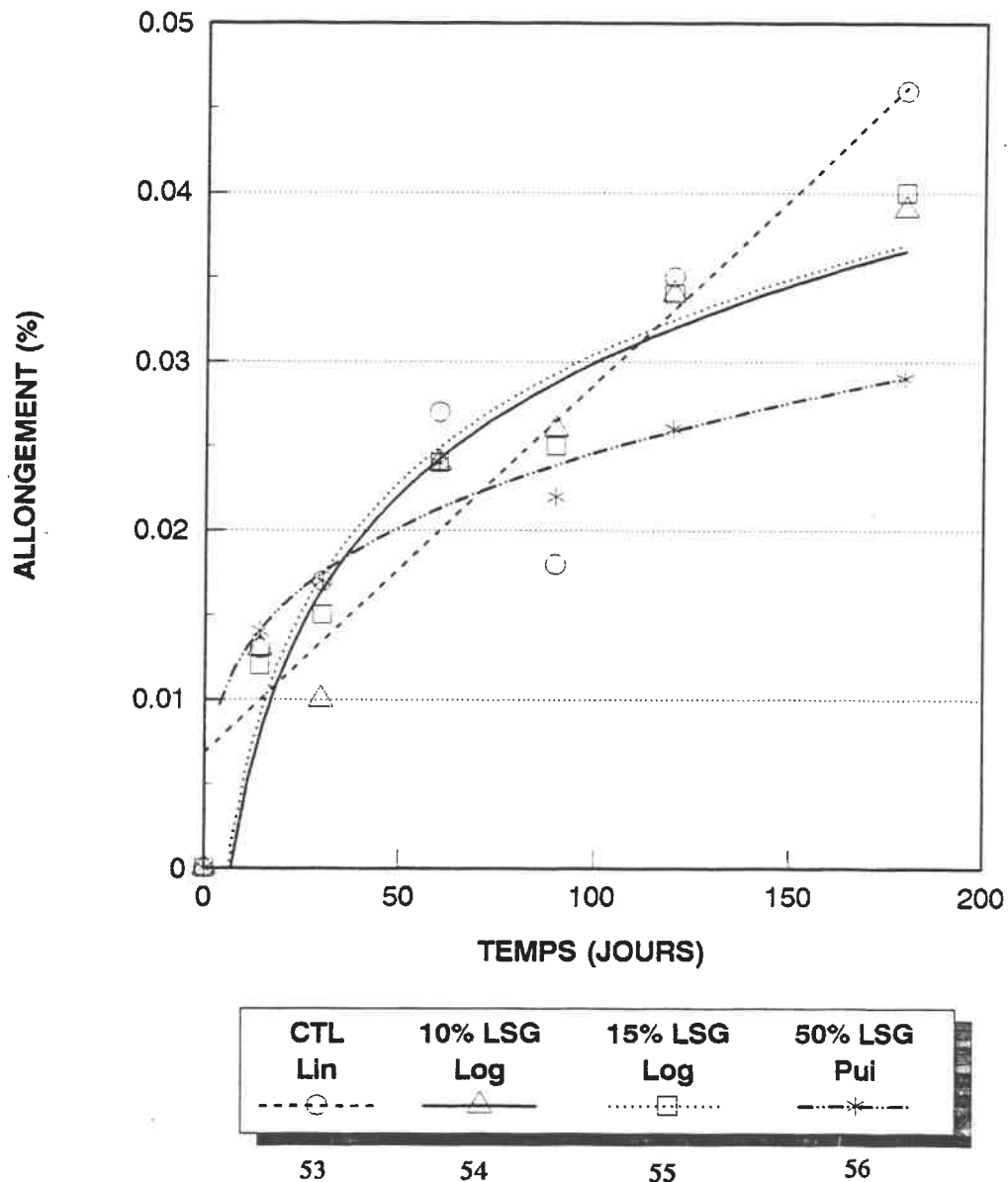


Fig. 55: Tendence des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT SHERBROOKE / ADDITIF LSG
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

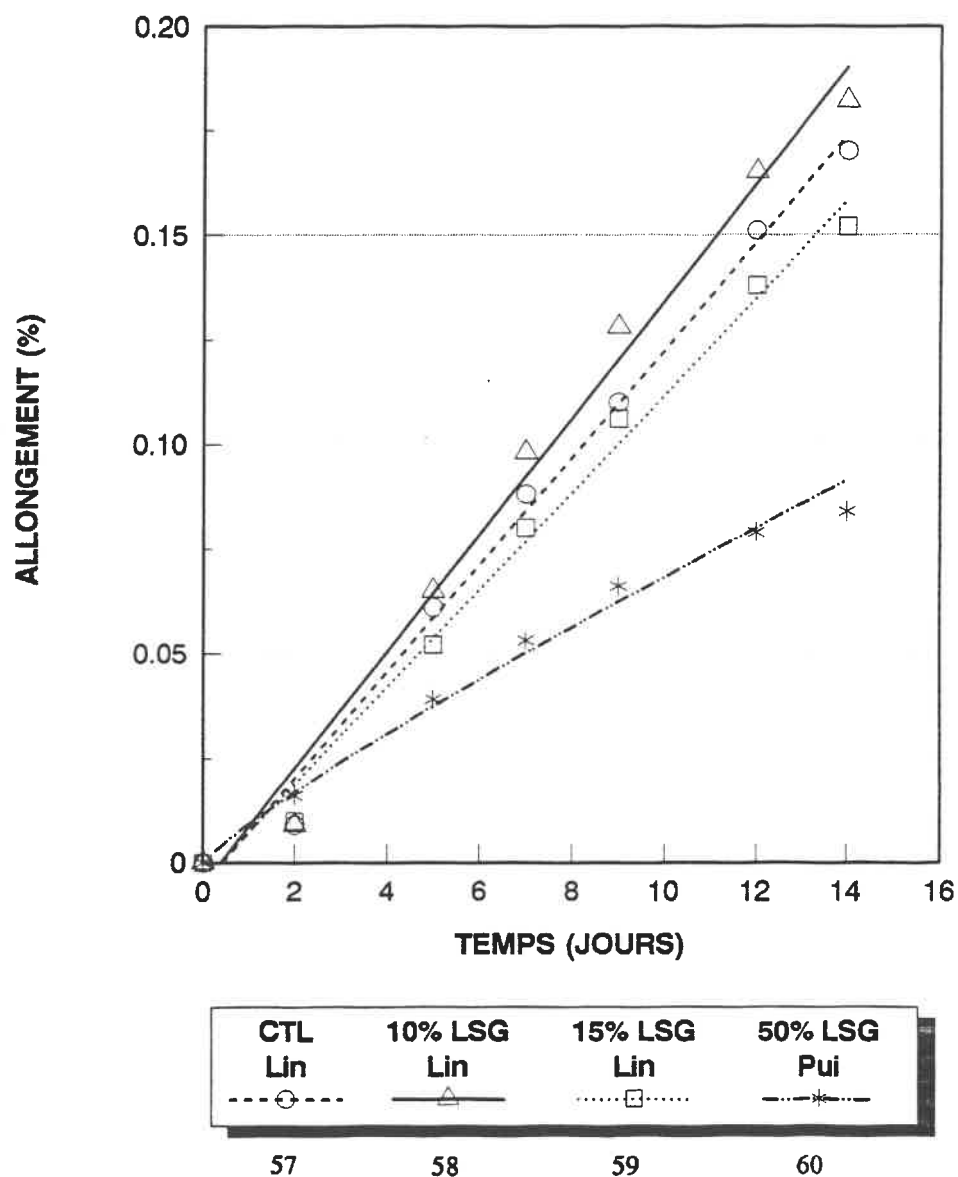


Fig. 56: Tendence des courbes d'expansion du schiste de Sherbrooke avec des remplacements de LSG avec l'essai accéléré.

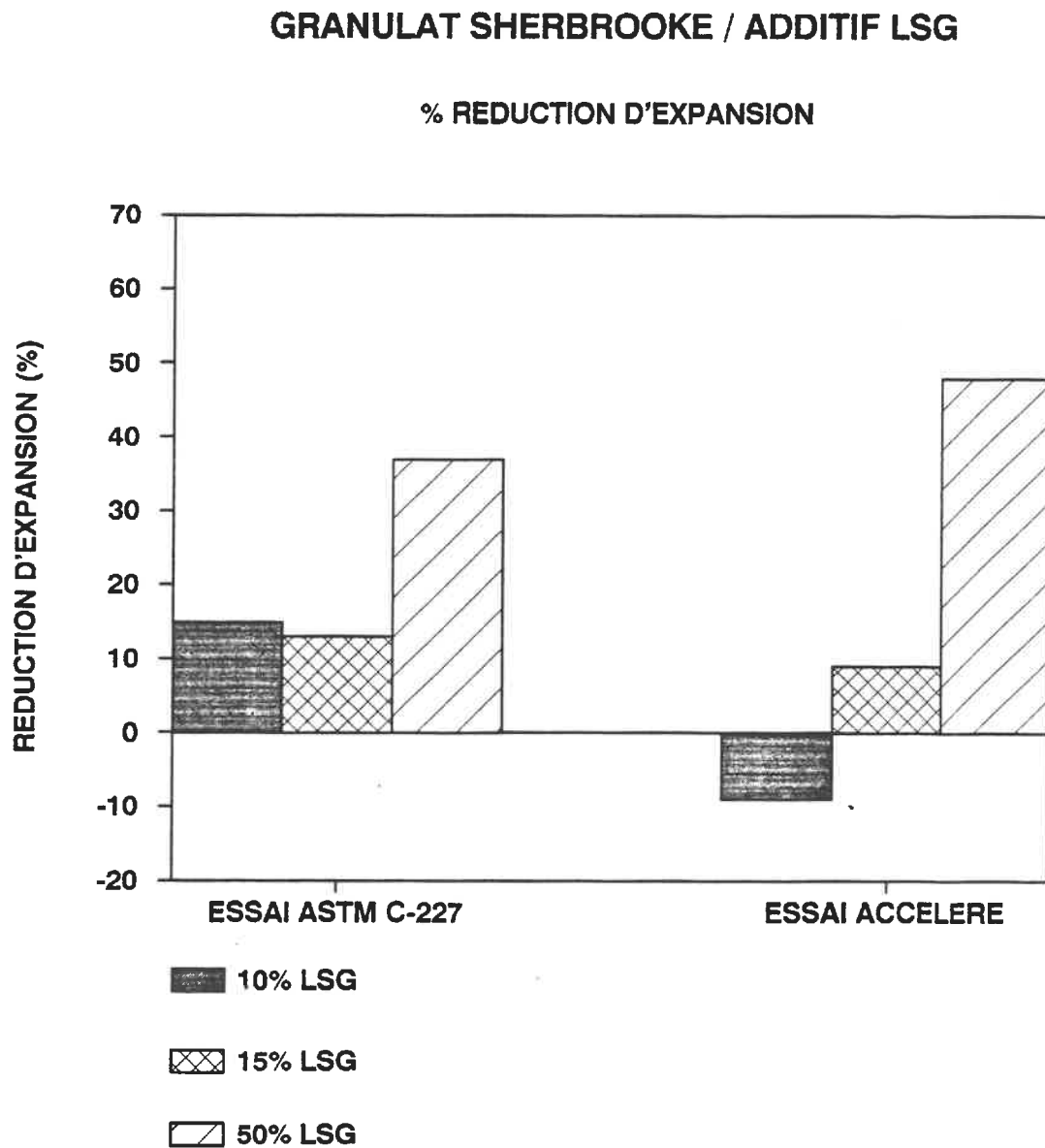


Fig. 57: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour le schiste de Sherbrooke.

7.5 DOLOMIE DE VALLEYFIELD

A la lueur des résultats des deux essais, il semble que le faciès dolomitique utilisé ne soit pas réactif face aux alcalis du ciment. En effet, de faibles expansions ont été mesurées pour l'échantillon contrôle ainsi que pour les divers mélanges de remplacement des additifs. Conséquemment, les expansions étant très petites, les résultats des réductions d'expansion sont affectés par une marge d'erreur plus importante comparativement aux trois autres granulats. L'interprétation de l'effet pouzzolanique des additifs sur ce granulat devient par ce fait, très hasardeuse.

7.5.1 Dolomie de Valleyfield versus FSC

1- Malgré de très faibles expansions, nous avons noté que l'ajout de fumée de silice influence le taux de réactivité de la dolomie, et ce pour les deux essais comme l'illustre le graphique des figures 58 et 59.

2- La tendance des courbes d'expansion obtenue avec l'essai ASTM est généralement convexe. Mais, comme le montre le graphique de la figure 60, une inversion de cette tendance pour un remplacement de 5% vient altérer l'homogénéité des résultats. Par contre, en se référant au graphique de la figure 61, on constate que sous l'essai accéléré la linéarité des courbes est maintenue

quelque soit le pourcentage de remplacement.

3- Les réductions d'expansion obtenues avec les résultats de l'essai accéléré sont proportionnelles aux taux de remplacement comme l'illustre l'histogramme de la figure 62.

Des réductions d'expansion légèrement inférieures sont obtenues avec l'essai ASTM C227. Un remplacement de 5% semble avoir légèrement plus d'effet de réduction d'expansion qu'un remplacement de 10% de FSC. On peut expliquer ce résultat non attendu par la marge d'erreur existant au niveau de la précision des mesures. En effet, les valeurs mesurées étant très petites, le pourcentage de réduction devient plus difficilement calculable de façon précise.

4- Le faciès dolomitique utilisé n'étant pas reconnu réactif lors des deux essais, l'utilisation de FSC n'est pas requise.

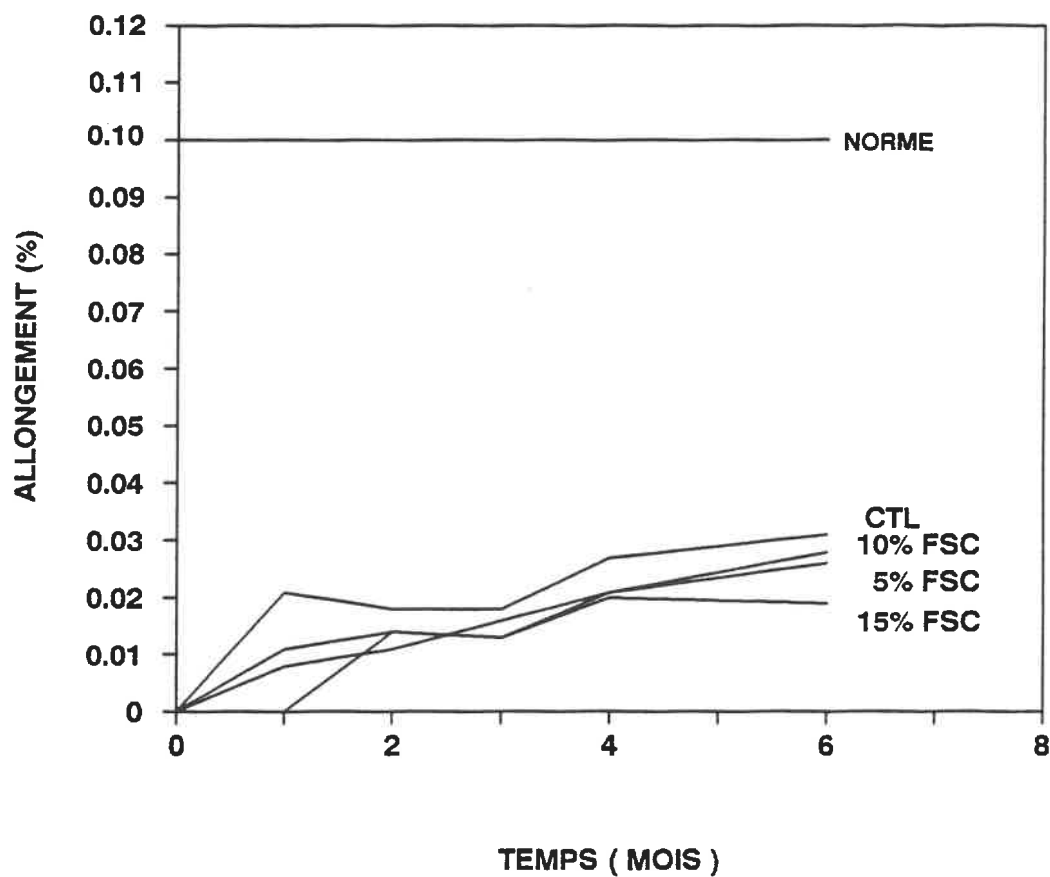
GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF FSC**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 58: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Valleyfield et la fumée de silice pour l'essai ASTM.

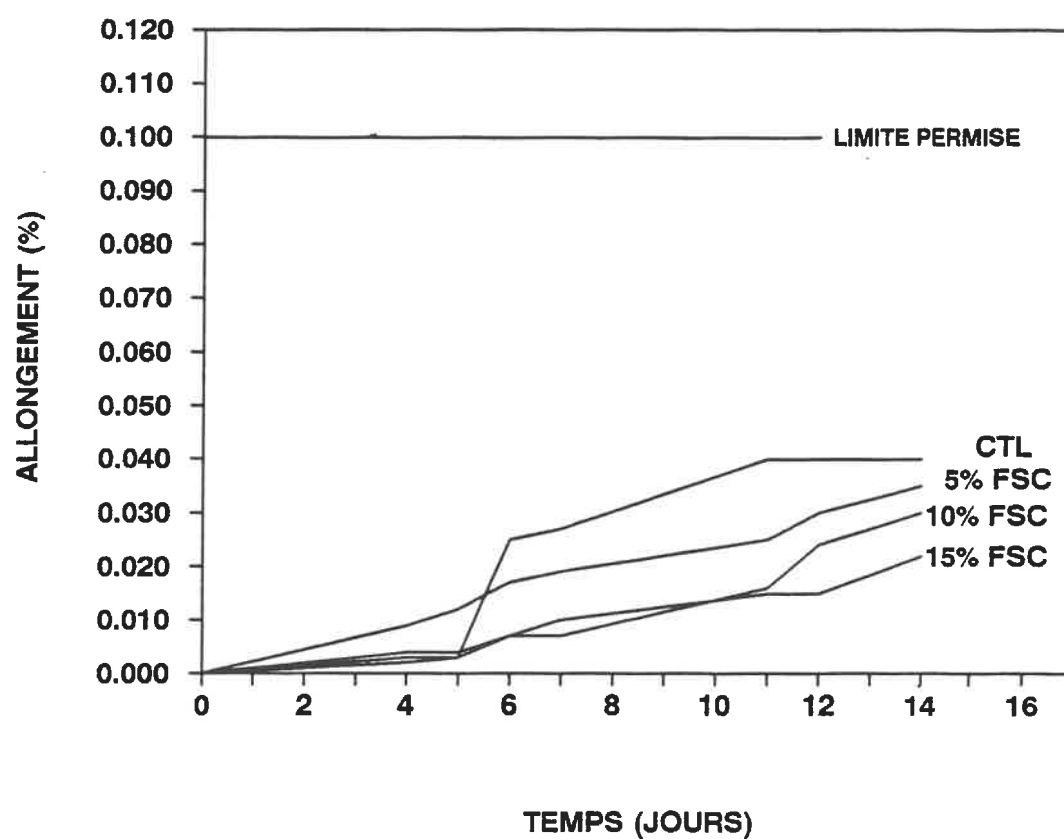
GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF FSC**ESSAI ACCELERE**

Fig. 59: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Valleyfield et la fumée de silice pour l'essai accéléré.

GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF FSC
ESSAI ASTM C227
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

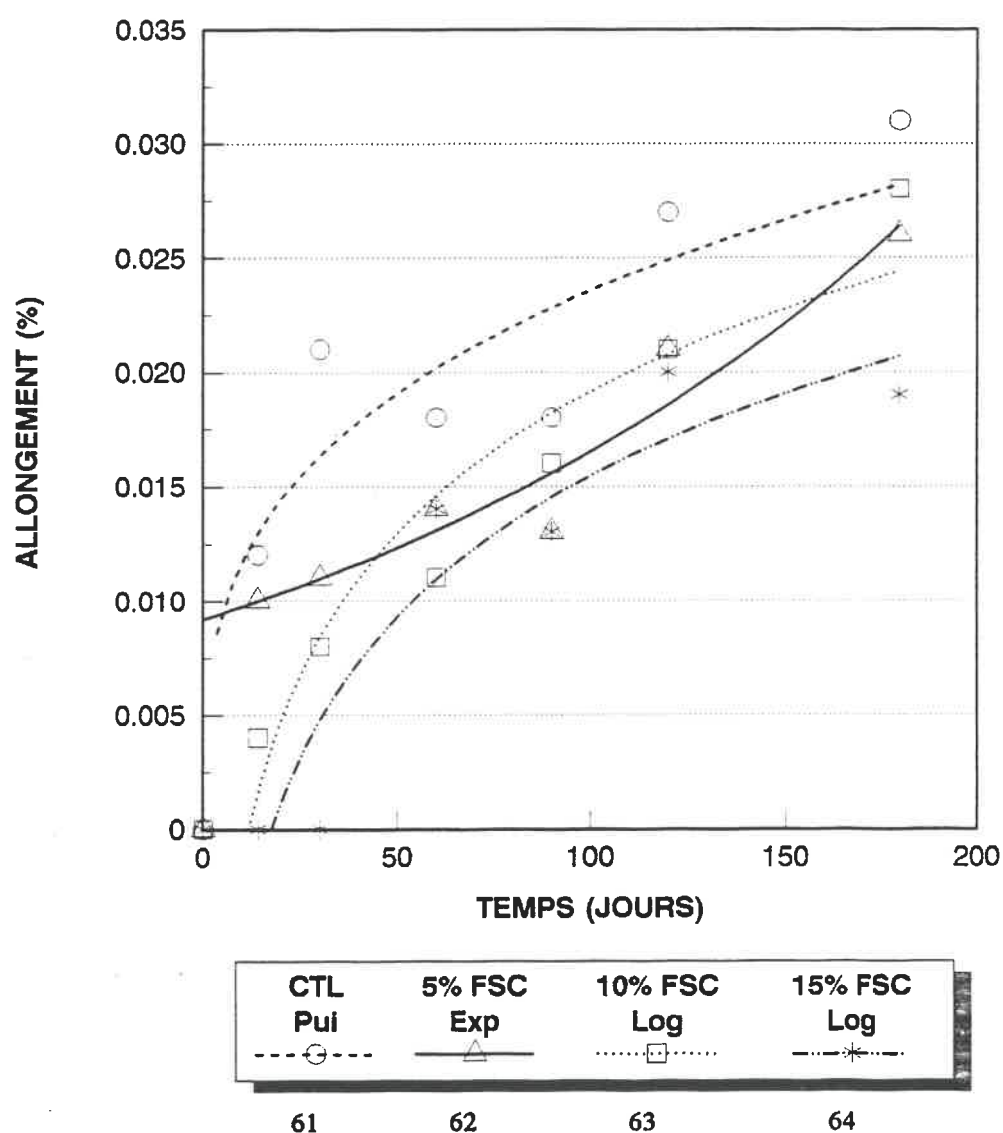


Fig. 60: Tendance des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de FSC avec l'essai ASTM C227.

GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF FSC
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

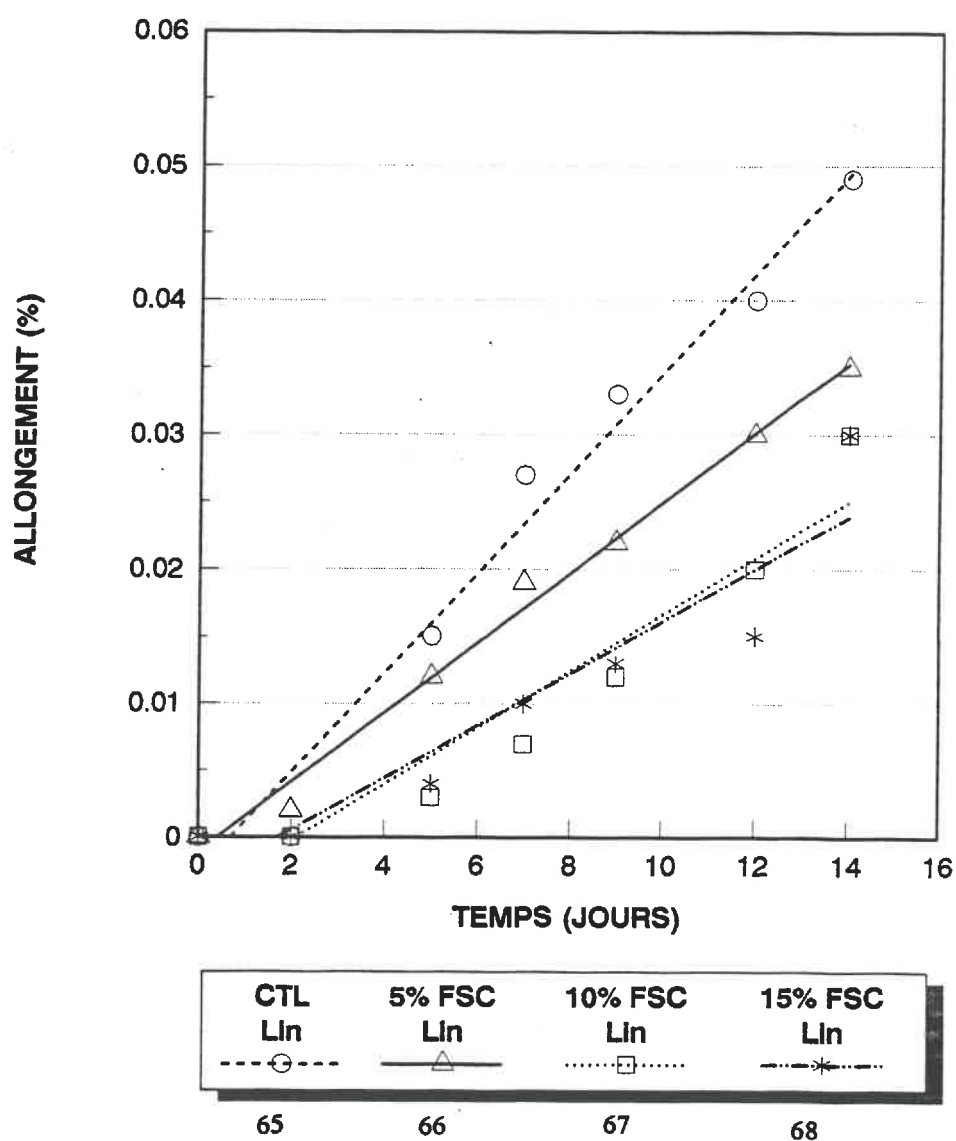


Fig. 61: Tendence des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de FSC avec l'essai accéléré.

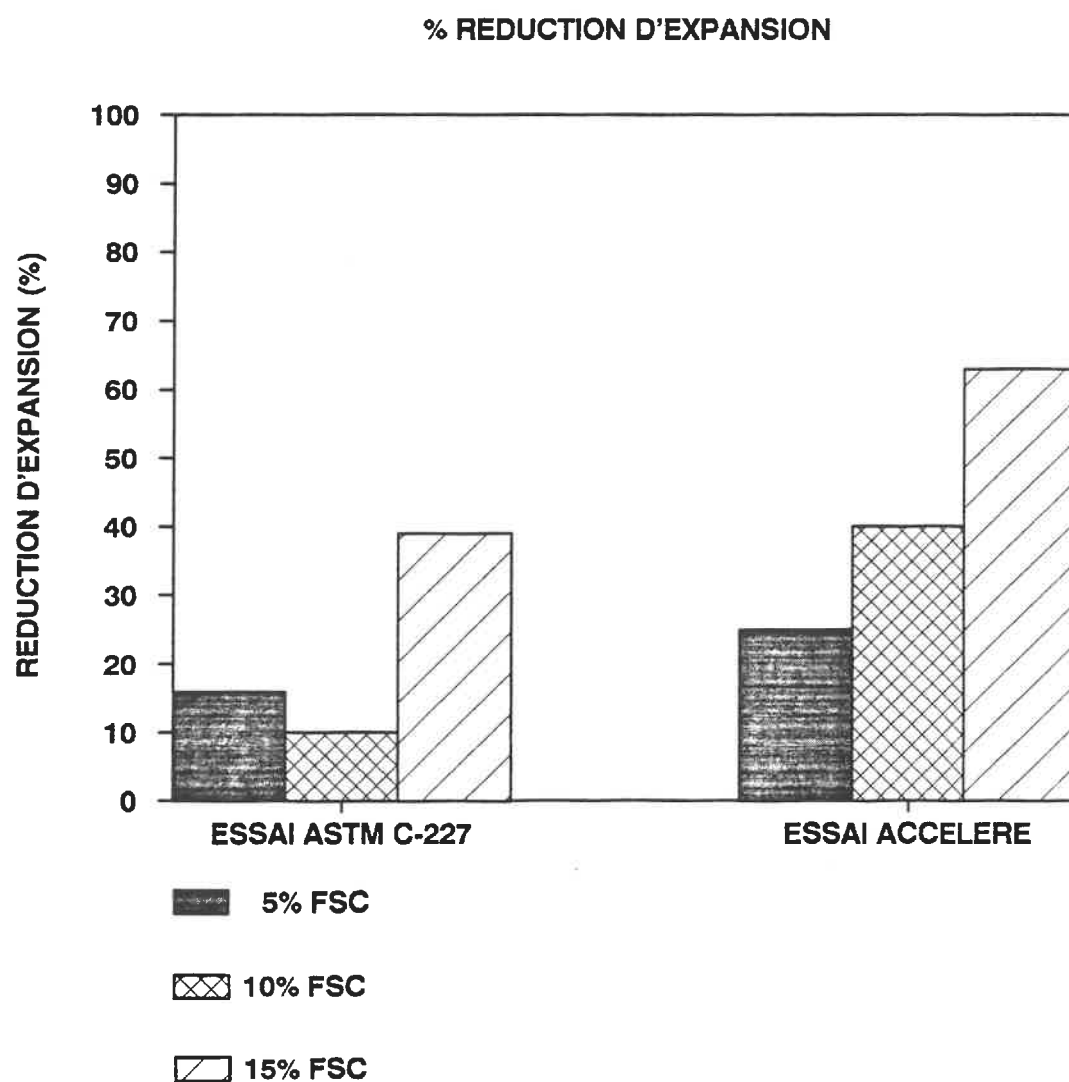
GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF FSC

Fig. 62: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec la fumée de silice condensée pour la dolomie de Valleyfield.

7.5.2 Dolomie de Valleyfield versus LSG

1- En observant les courbes des graphiques des figures 63 et 64, l'effet de l'ajout de laitier aux mélanges soumis à la cure des essais ASTM C227 et accéléré n'est pas très significatif. En effet, les courbes d'expansion sont très rapprochées les unes des autres et très en deça des limites fixées. Par ce fait même, l'interprétation des résultats devient plus difficile.

2- Malgré les faibles expansions obtenues, les tendances des courbes d'expansion sont différentes d'un essai à l'autre. En effet, la forme des courbes pour l'essai accéléré est plutôt linéaire et légèrement concave tandis que les courbes de l'essai ASTM ont une tendance très convexe (voir graphique des figures 65 et 66). Un léger fléchissement des courbes est observée avec l'augmentation de l'ajout de LSG pour l'essai ASTM. Cette observation n'est pas notée pour l'essai accéléré: les courbes sont plutôt regroupées sous un même profil.

3- Malgré le rapprochement des courbes d'expansion, d'importantes réductions d'expansion sont obtenues et ces réductions semblent proportionnelles aux taux de remplacement de LSG pour l'essai ASTM. L'analyse de l'effet du laitier sur la dolomie avec la cure accélérée n'est pas aussi aisée. En effet, les réductions d'expansion obtenues ne semblent pas avoir de rapport entre elles.

L'histogramme de la figure 67 illustre bien l'incohérence des résultats. Le "profil" obtenu pour cet essai ne représente pas une bonne corrélation entre le taux de remplacement et les réductions d'expansion correspondantes.

4- L'importance de la marge d'erreur associée à la faible réactivité de la dolomie nous empêche de porter un jugement valable en ce qui concerne l'efficacité pouzzolanique du laitier en cure accélérée. Par contre, pour l'essai ASTM, les résultats observés semblent conformes aux hypothèses émises.

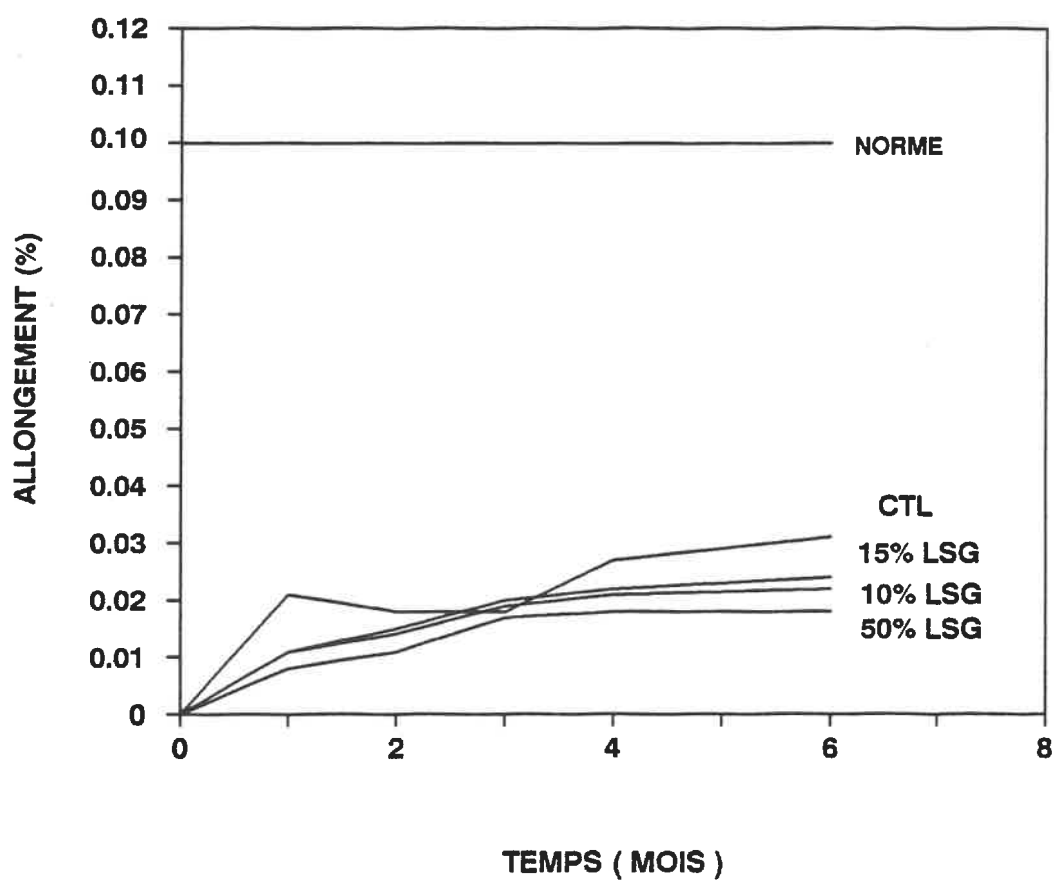
GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF LSG**ESSAI ASTM C-227**

Fig. 63: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulat de Valleyfield et le laitier silicaté granulé pour l'essai ASTM.

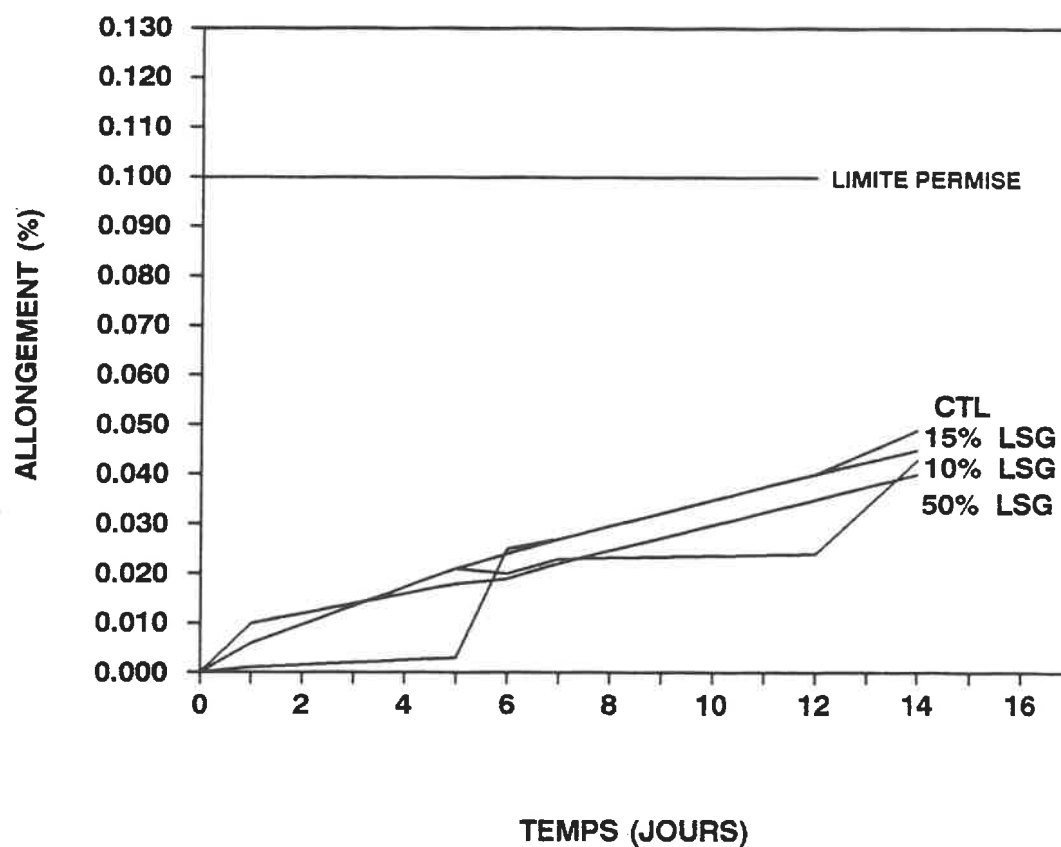
GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF LSG**ESSAI ACCELERE**

Fig. 64: Evolution de l'expansion des barres de mortier confectionnées avec le granulats de Valleyfield et le laitier silicaté granulé pour l'essai accéléré.

GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF LSG
ESSAI ASTM C227
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

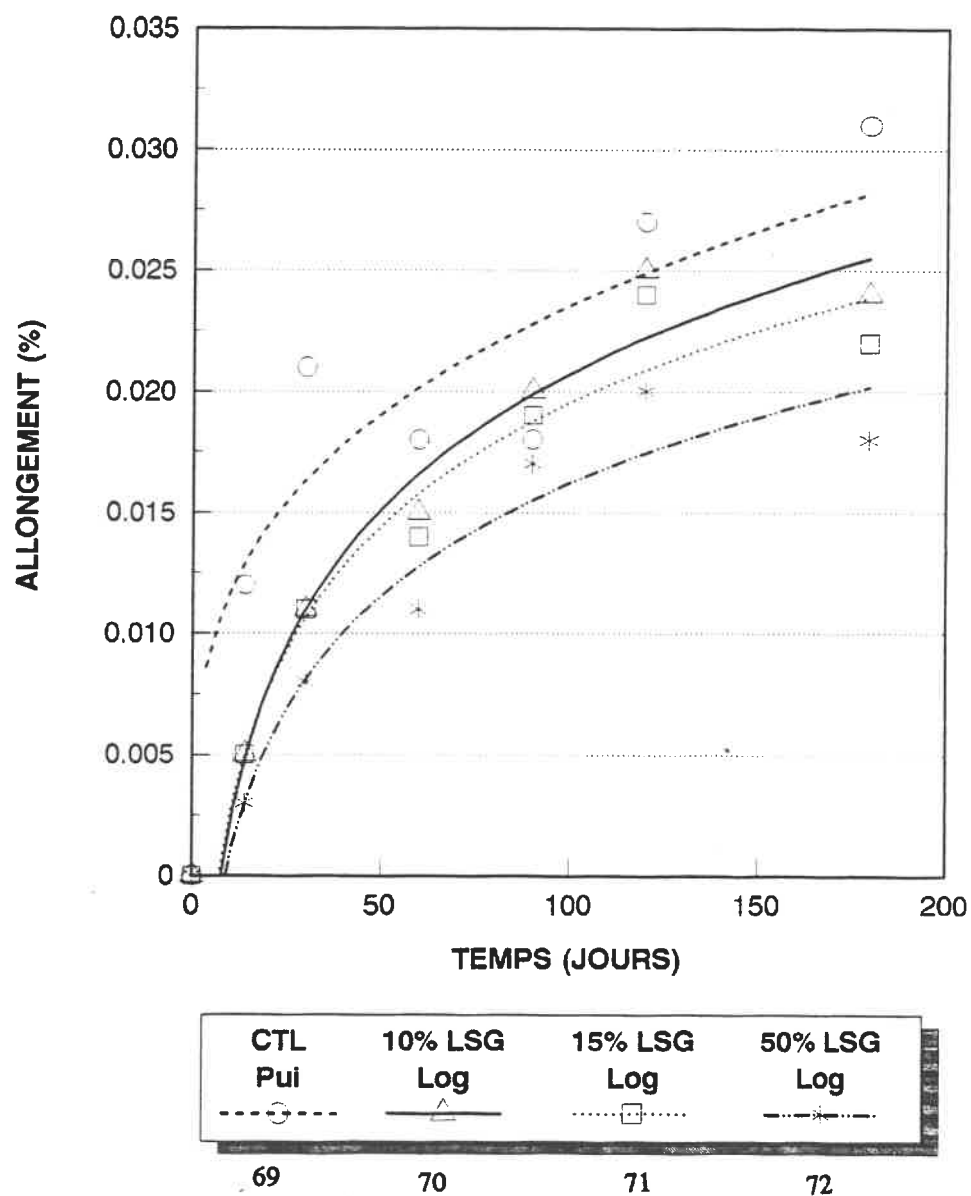


Fig. 65: Tendence des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de LSG pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF LSG
ESSAI ACCELERE
TENDANCE DES COURBES D'EXPANSION

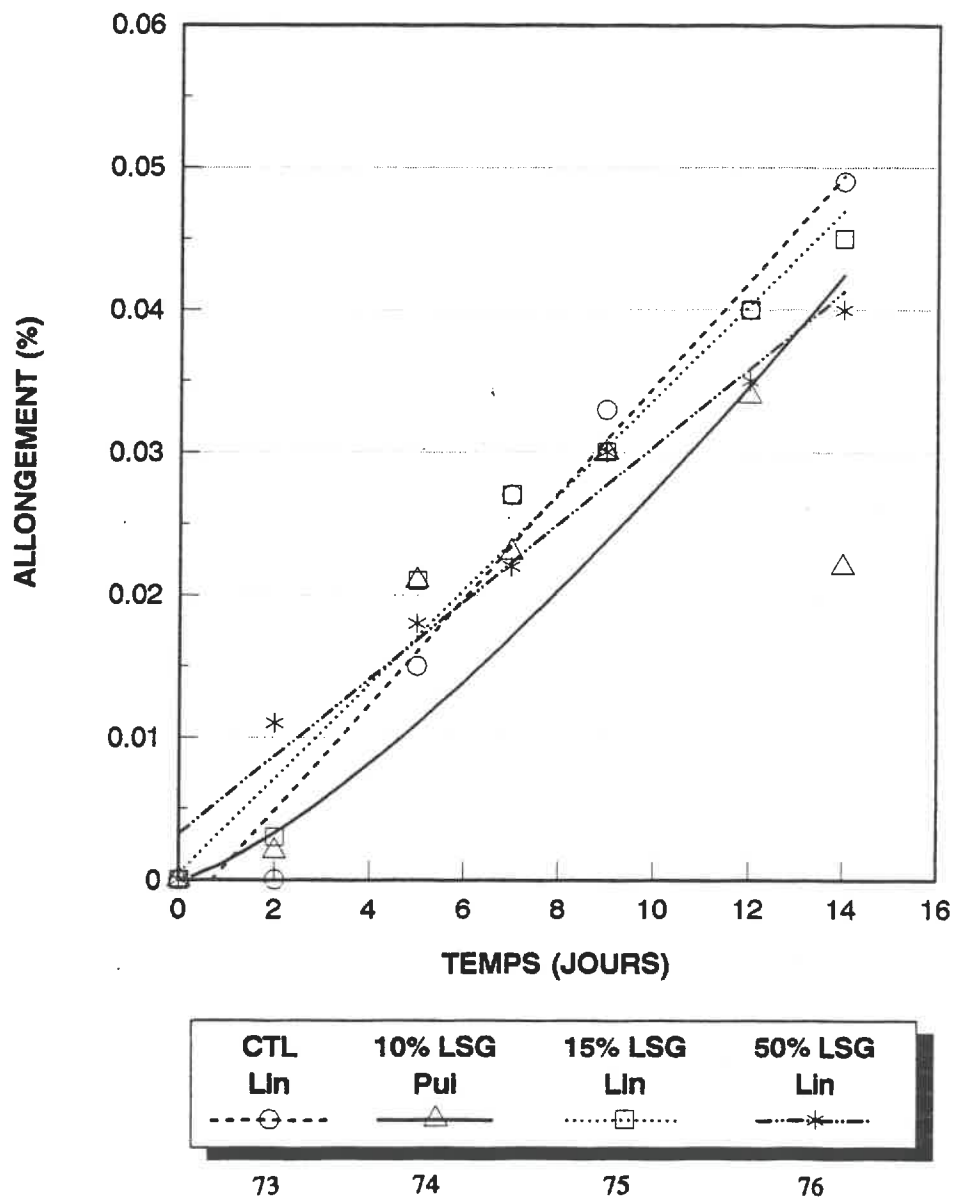


Fig. 66: Tendence des courbes d'expansion de la dolomie de Valleyfield avec des remplacements de LSG pour l'essai accéléré.

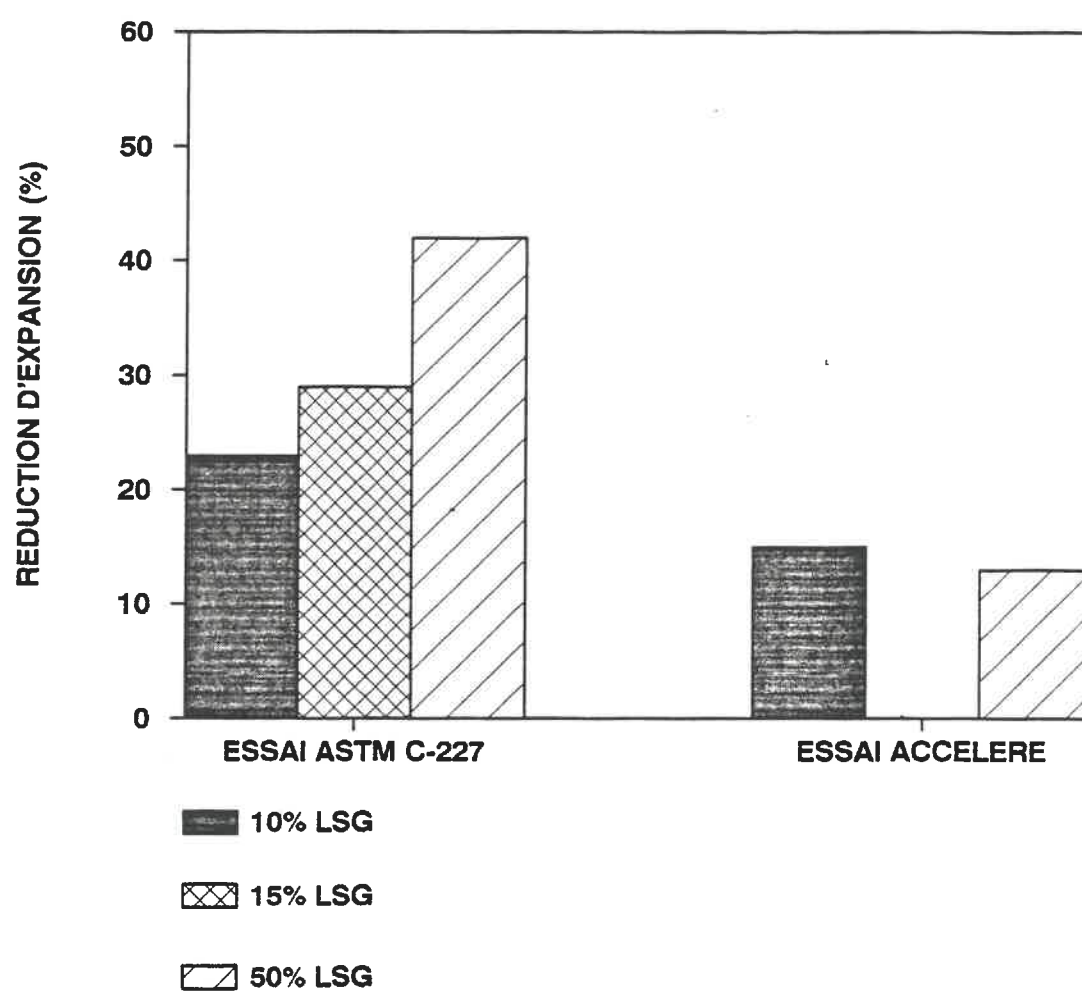
GRANULAT VALLEYFIELD / ADDITIF LSG**% REDUCTION D'EXPANSION**

Fig. 67: Histogramme des réductions d'expansion obtenues avec le laitier silicaté granulé pour la dolomie de Valleyfield.

7.6 EFFETS DES ADDITIFS SUR LA RÉACTIVITÉ DES GRANULATS

En vue de vérifier l'effet des additifs sur le taux de réactivité de chaque granulats, nous avons disposé sur des graphiques les courbes d'expansion "moyennes" correspondantes à chaque additif et ce, pour les quatre granulats. Les courbes d'expansion calculées représentent une moyenne des courbes des divers remplacements. Par exemple, la moyenne des courbes obtenues avec 5%, 10% et 15% de FSC ou avec 10%, 15% et 50% de LSG selon le cas. Ainsi, sur les graphiques des figures 68 à 75, il est possible d'observer l'effet général d'un additif sur un granulats en regard de la forme de la courbe. Afin d'établir une comparaison avec l'échantillon contrôle, nous avons tracé la courbe d'expansion correspondante sur chacun des graphiques.

Pour le calcaire d'Ottawa, aucune similitude entre les courbes de l'essai accéléré et ASTM n'est observée. La forme des courbes des additifs est très différente d'un essai à l'autre comme l'illustrent les graphiques des figures 68 et 69.

Pour le tuf de Beauceville, seule la fumée de silice se comporte de façon identique d'un essai à l'autre (voir graphique des figures 70 et 71).

Dans le cas du schiste de Sherbrooke, l'échantillon contrôle et les deux additifs ont le même effet pour les deux essais. En effet, comme le démontrent les graphiques des figures 72 et 73, les courbes sont similaires d'un essai à l'autre.

Les courbes obtenues avec la dolomie de Valleyfield sont semblables pour les deux additifs. Par contre, les courbes de l'échantillon contrôle n'ont pas d'affinités entre elles d'un essai à l'autre (voir graphique des figures 74 et 75).

D'après ces graphiques, on note deux faits intéressants:

1- Quelque soit le type de granulat et pour les deux types de cure, la tendance moyenne des expansions avec la fumée de silice est linéaire (7 cas sur 8).

2- De même, la tendance moyenne des courbes d'expansion des mélanges de mortier confectionnés avec le laitier silicaté est convexe (7 cas sur 8), et ce, quelque soit le type de granulat ou de cure.

GRANULAT OTTAWA / ESSAI ASTM C227

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

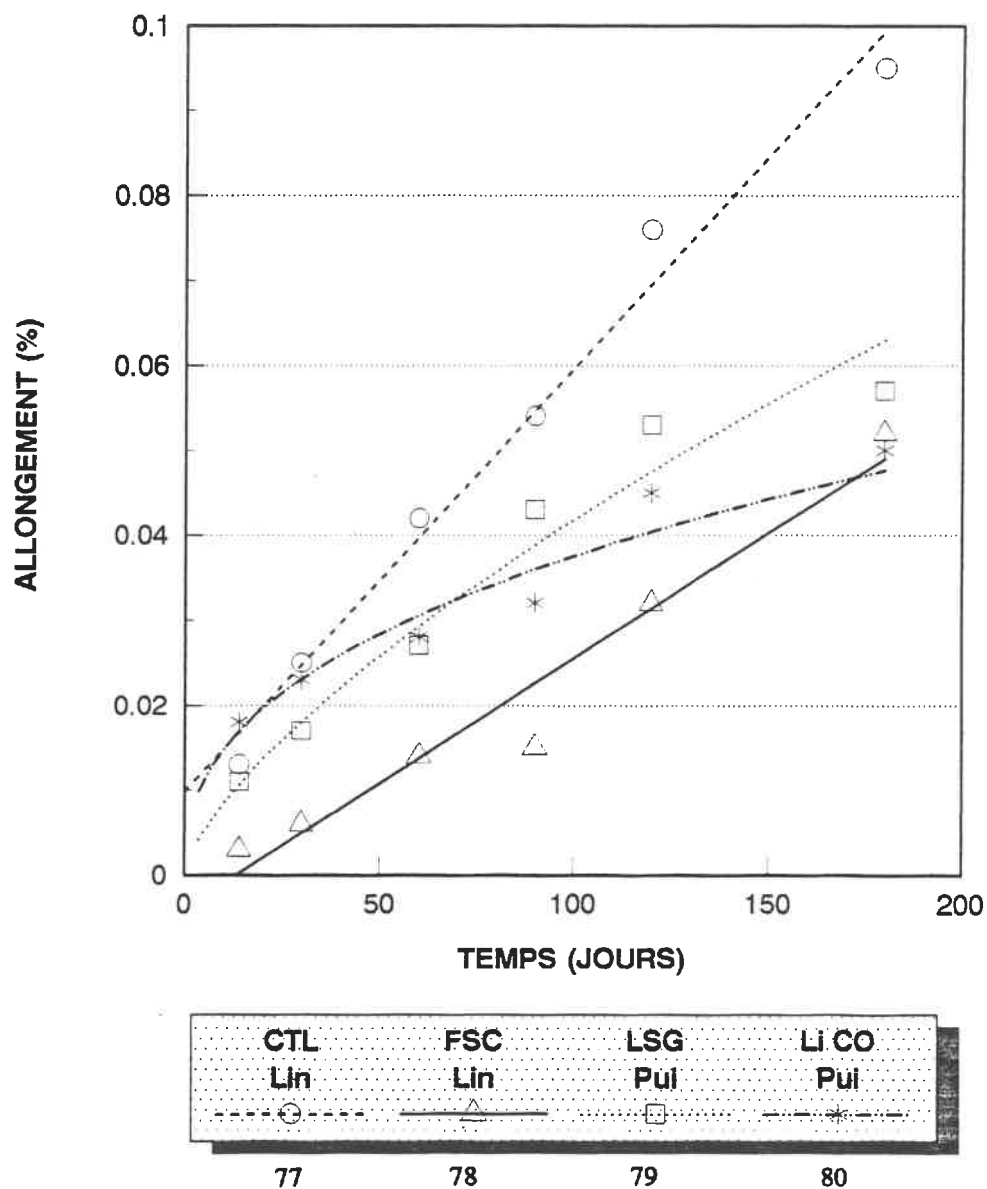


Fig. 68: Tendance moyenne des différents additifs avec le granulat Ottawa pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT OTTAWA / ESSAI ACCELERE

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

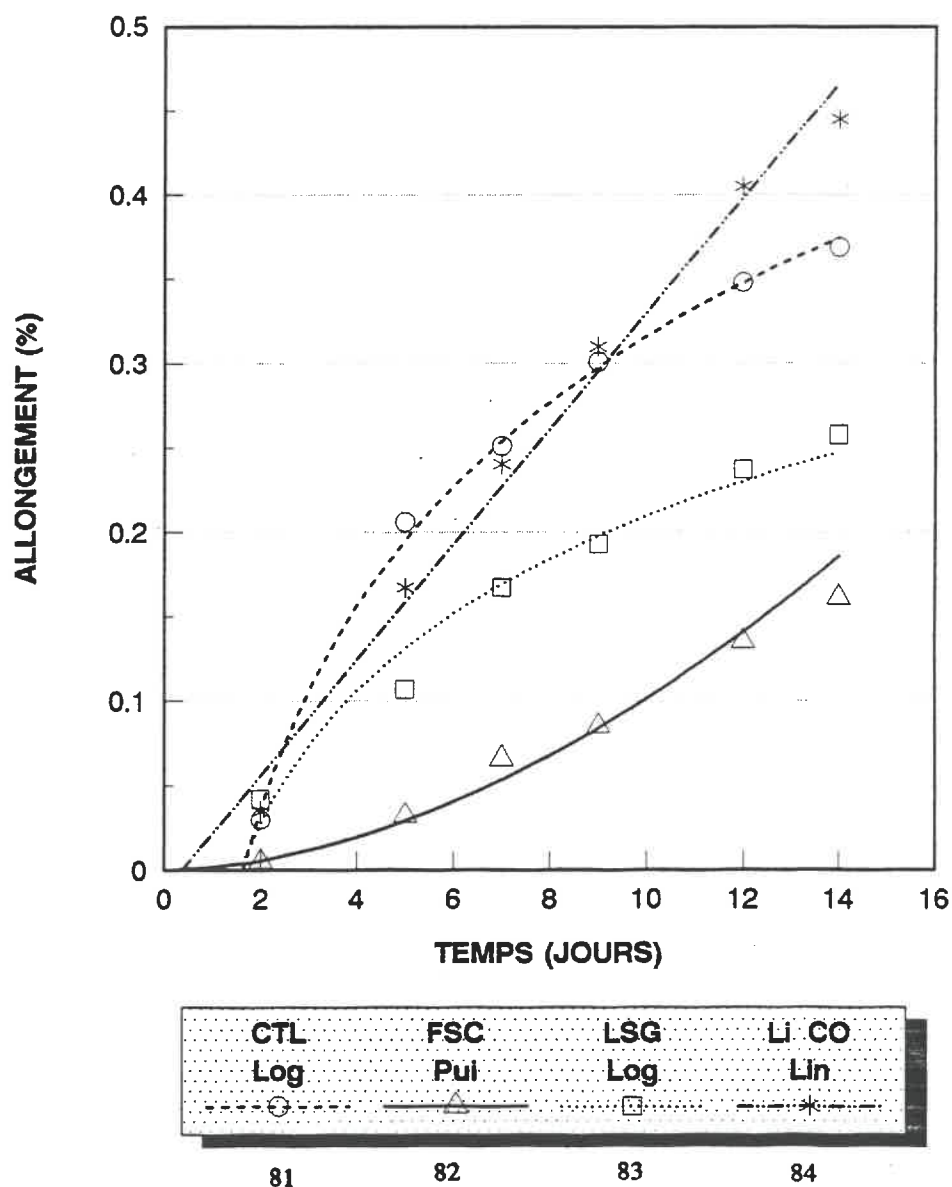


Fig. 69: Tendence moyenne des différents additifs avec le granulat d'Ottawa pour l'essai accéléré.

GRANULAT BEAUCEVILLE / ESSAI ASTM C227

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

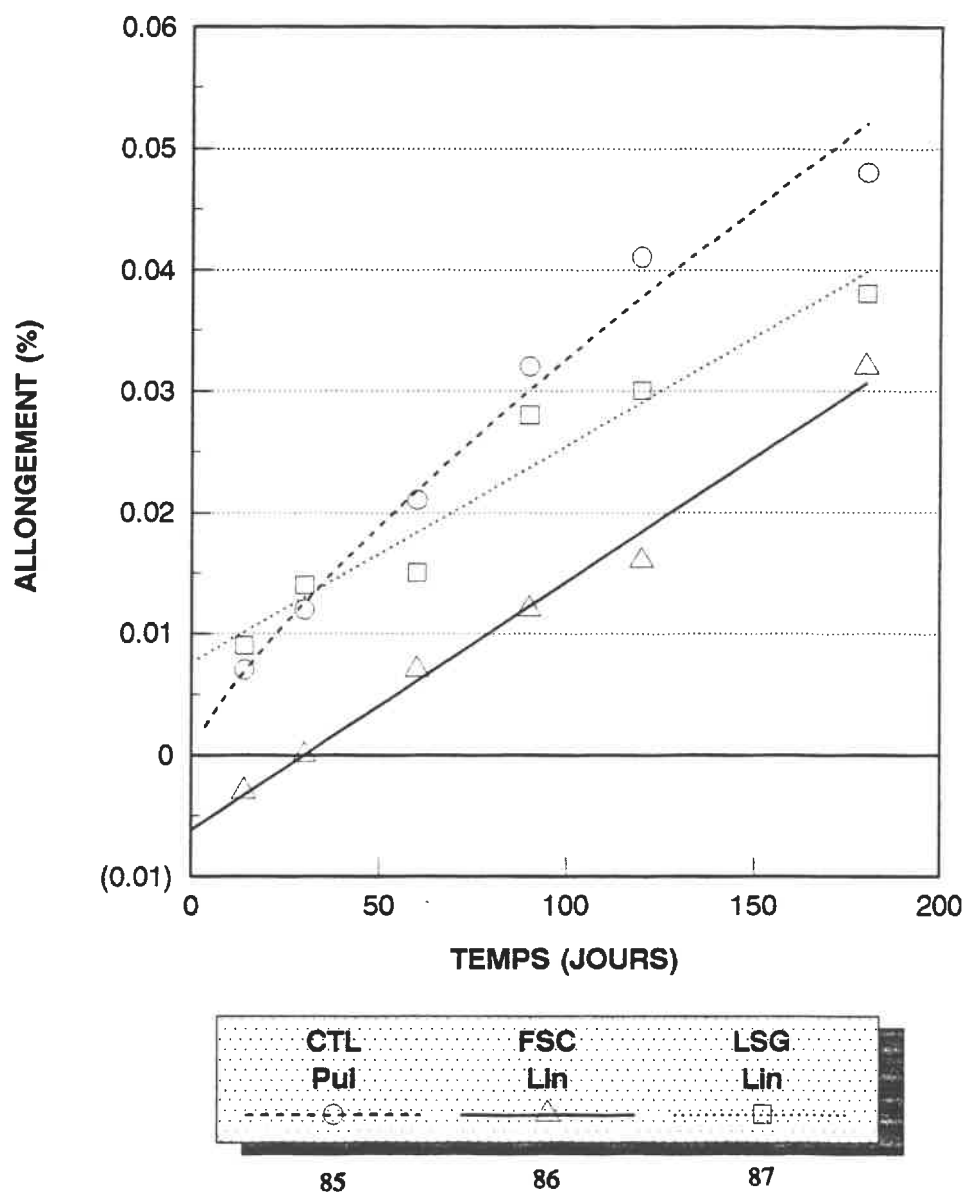


Fig. 70: Tendence moyenne des différents additifs avec le granulats de Beauceville pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT BEAUCEVILLE / ESSAI ACCELERE

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

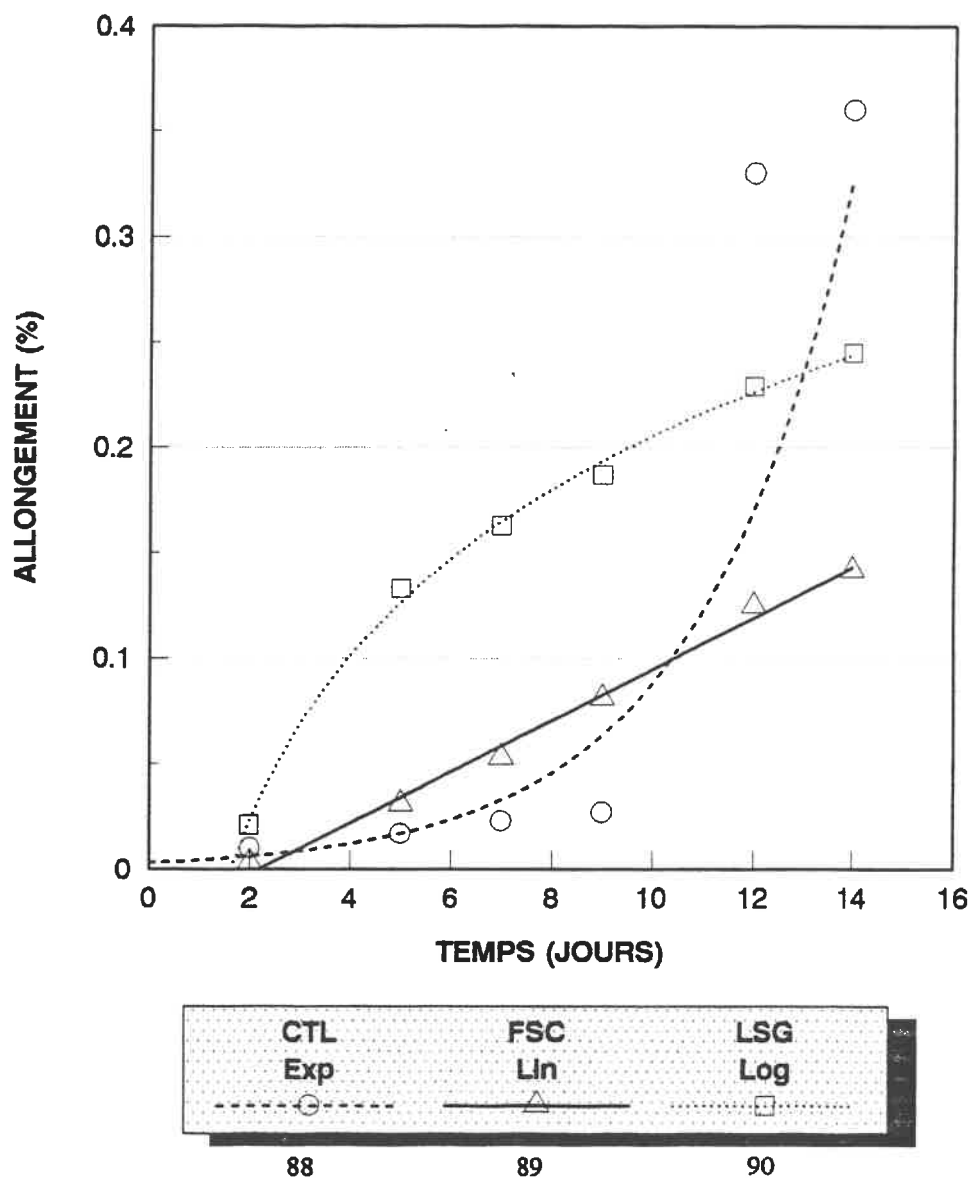


Fig. 71: Tendence moyenne des différents additifs avec le granulat de Beauceville pour l'essai accéléré.

GRANULAT SHERBROOKE / ESSAI ASTM C227

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

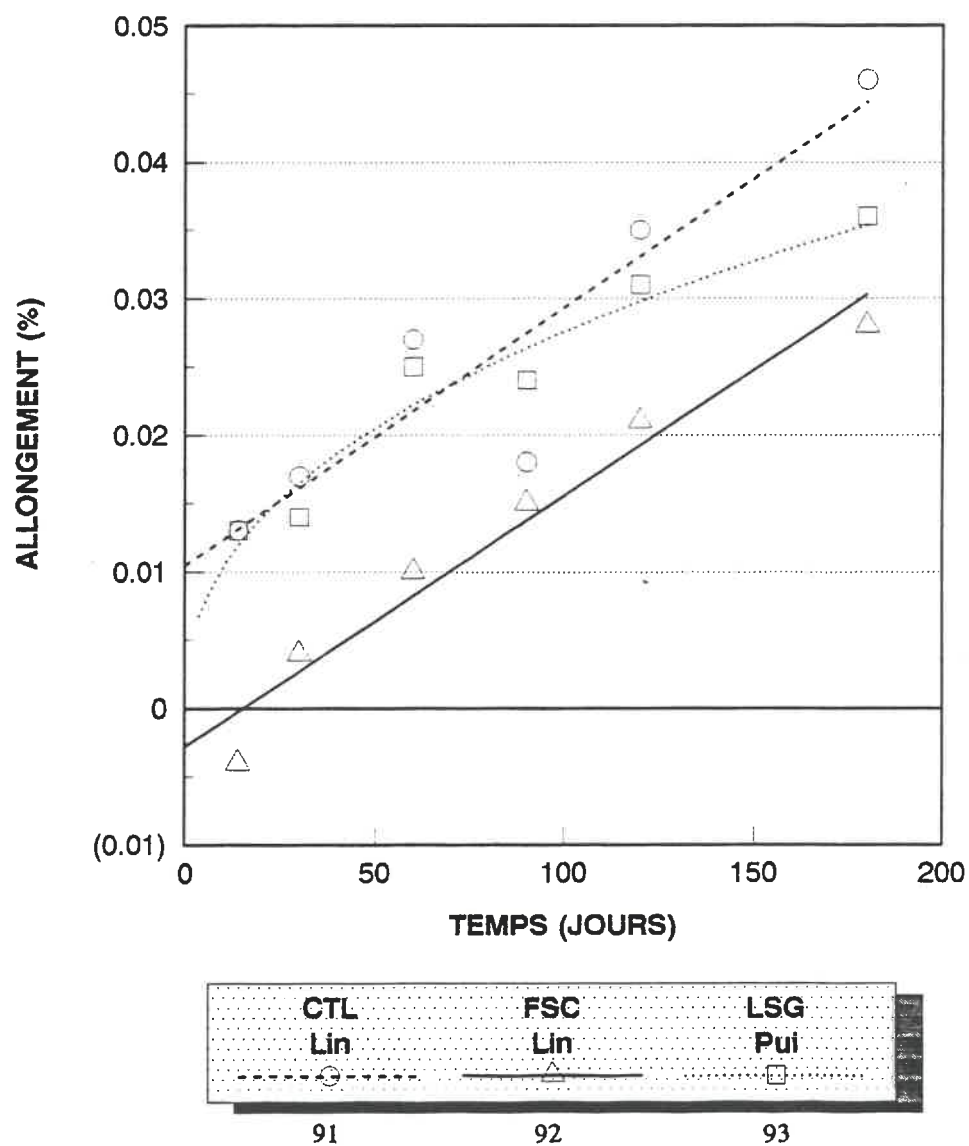


Fig. 72: Tendence moyenne des différents additifs avec le granulats de Sherbrooke pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT SHERBROOKE / ESSAI ACCELERE

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

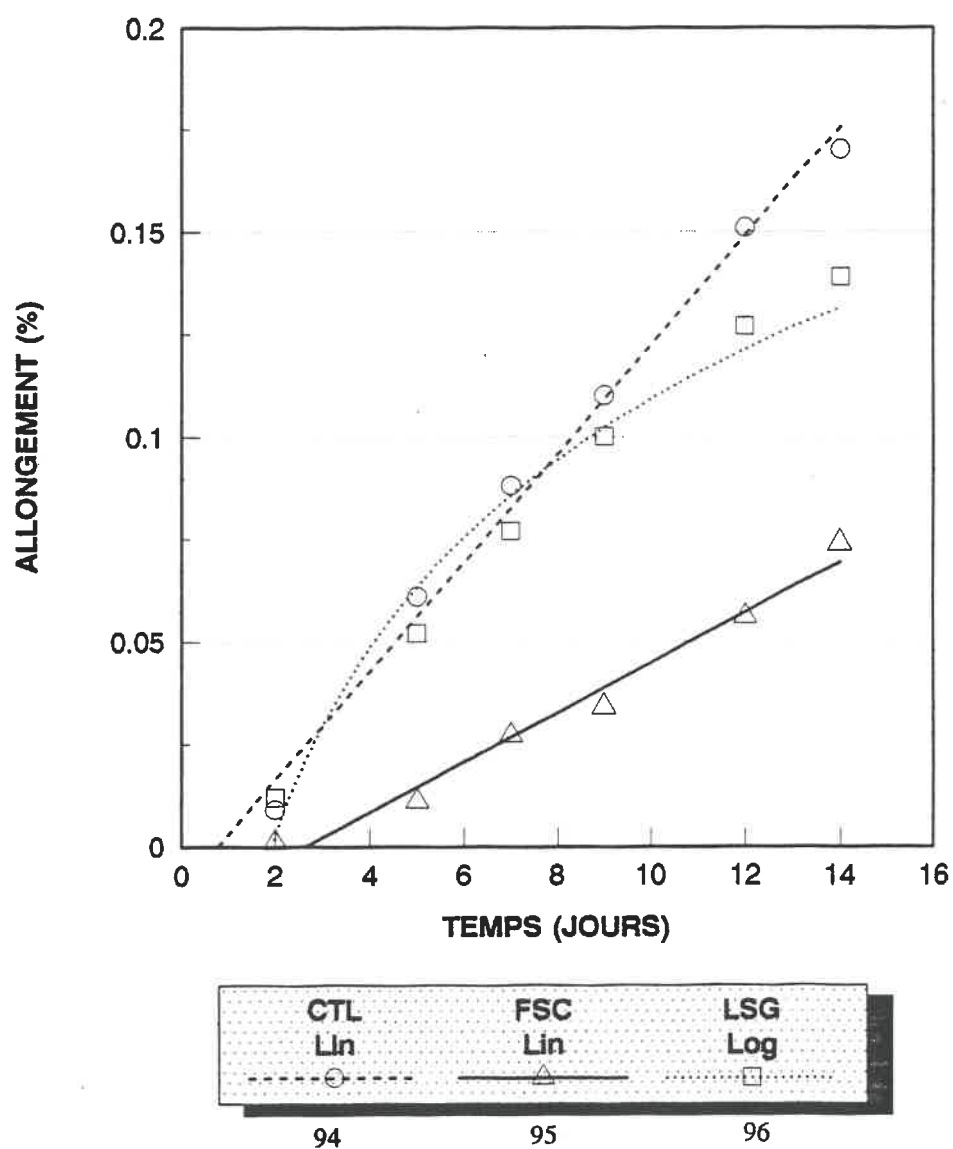


Fig. 73: Tendence moyenne des différents additifs avec le granulat de Sherbrooke pour l'essai accéléré.

GRANULAT VALLEYFIELD / ESSAI ASTM C227

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

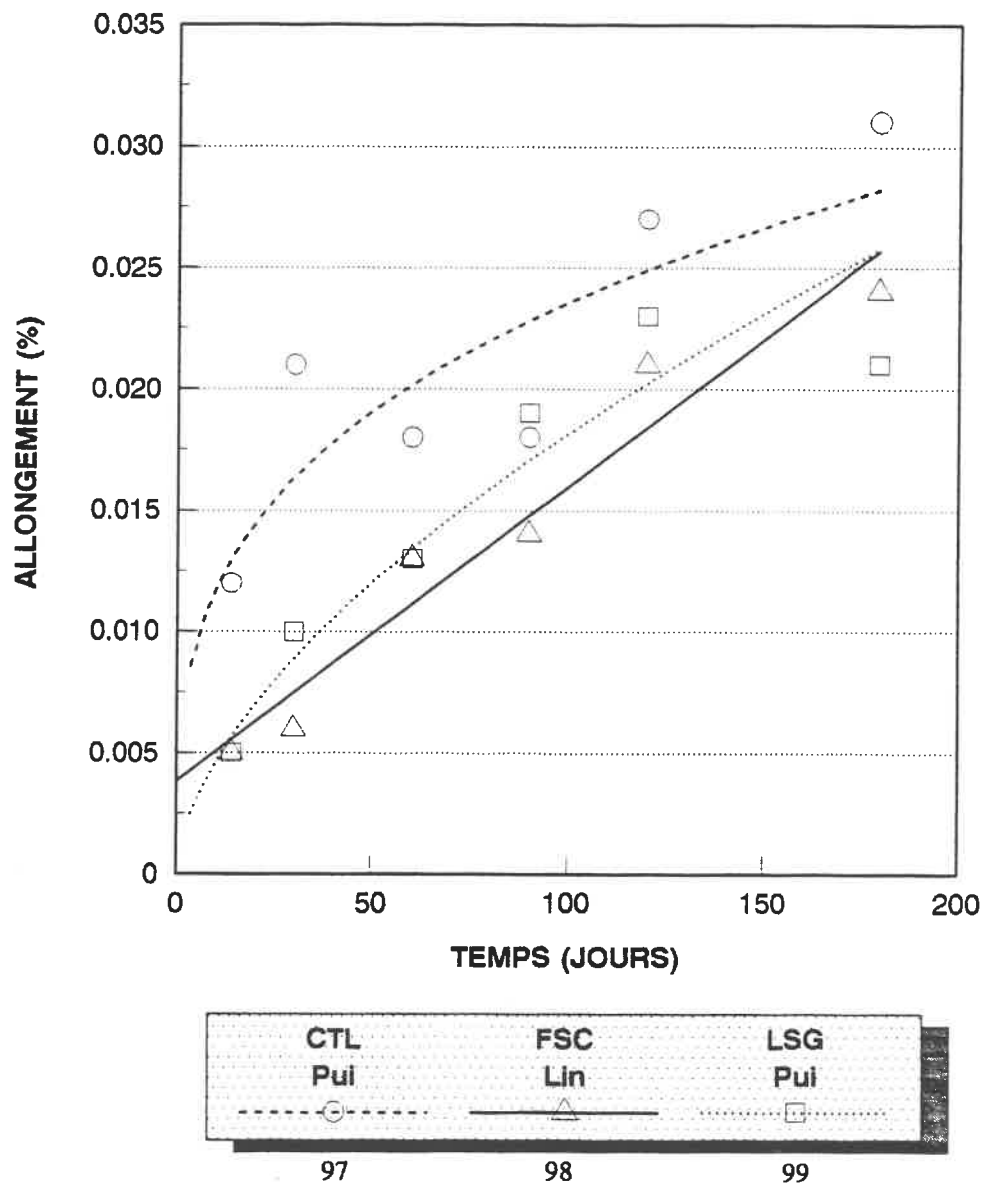


Fig. 74: Tendence des différents additifs avec le granulat de Valleyfield pour l'essai ASTM C227.

GRANULAT VALLEYFIELD / ESSAI ACCELERE

MOYENNE DES COURBES D'EXPANSION

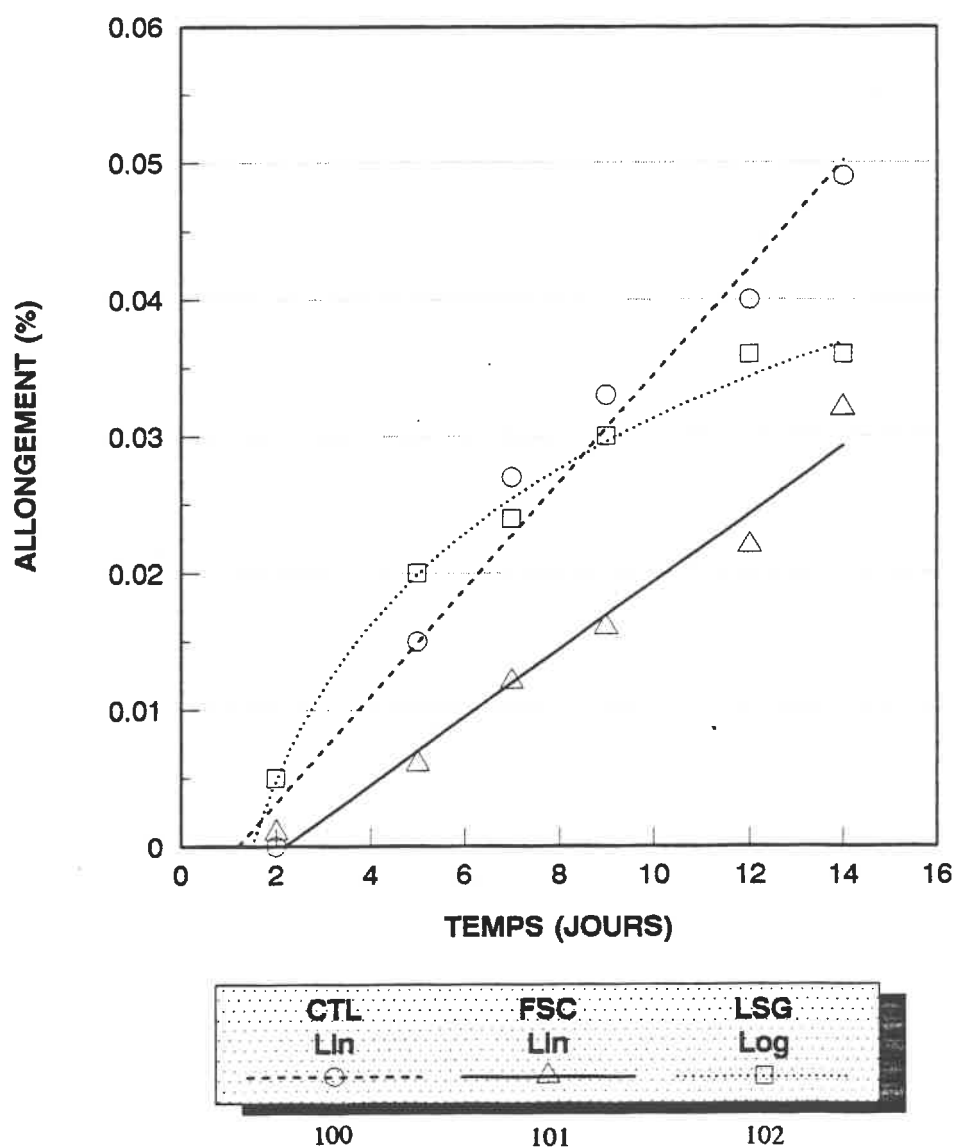


Fig. 75: Tendance des différents additifs avec le granulat de Valleyfield pour l'essai accéléré.

7.7 CORRÉLATIONS ENTRE L'ESSAI ASTM C 227 ET L'ESSAI ACCÉLÉRÉ

Les résultats des corrélations obtenus dans le sous-chapitre précédent indiquent qu'il existe bien une relation entre la présence d'additif de nature pouzzolanique et la réduction de la réactivité des granulats. Les réductions de réactivité sont généralement proportionnelles à la quantité d'additif présent dans le mélange de mortier quelque soit le type de cure. Il faut toutefois noter que l'importance de l'effet de ces additifs peut être différente d'une cure à l'autre. L'effet d'"imperméabilisation" des additifs devient plus significative pour la cure accélérée qui nécessite une immersion des échantillons dans un liquide. Ainsi, dans ce sous-chapitre, nous tenterons de voir s'il existe une correspondance entre l'effet des additifs et les cures utilisées.

Nous avons tenté d'établir des correspondances entre les granulats et les additifs pour chacun des deux essais. Pour ce faire, nous avons disposé les réductions d'expansion observées pour chaque granulat en fonction des pourcentages de remplacement des additifs. Les corrélations ont été faites pour les deux types d'essai.

Comme nous l'observerons plus loin, les corrélations obtenues entre les deux

variables sont bonnes à moyennes (voir figures 76 à 79). Les valeurs calculées des coefficients de détermination " r^2 " sont toutefois meilleures pour ce qui est de l'essai accéléré. Quel que soit le type de cure utilisée, la courbe obtenue avec la fumée de silice est légèrement convexe. Par contre, la courbe obtenue avec le laitier est linéaire avec l'essai ASTM C227 et convexe avec l'essai accéléré. Grossièrement, ces deux additifs conservent leurs propriétés spécifiques pour n'importe quel type de granulat, quelque soit le taux de remplacement. La fumée de silice condensée en comparaison avec le laitier est toutefois beaucoup plus efficace pour des taux de remplacement égaux. La granulométrie de la fumée de silice permet probablement une hydratation complète des particules, ce qui n'est peut-être pas le cas du laitier. C'est-à-dire qu'il reste toujours des grains de laitier non-hydratés dans la pâte de ciment, ce qui diminue son efficacité.

Il est à noter que les réductions d'expansion concernant la dolomie de Valleyfield n'ont pas été considérées lors du calcul des régressions. Comme nous l'avions déjà mentionné, les faibles expansions mesurées pour ce granulat sont associées à une erreur relative importante. Les courbes reliées à la dolomie sont tracées sur les graphiques des pages suivantes à titre indicatif seulement.

ESSAI ASTM C-227 / ADDITIF FSC

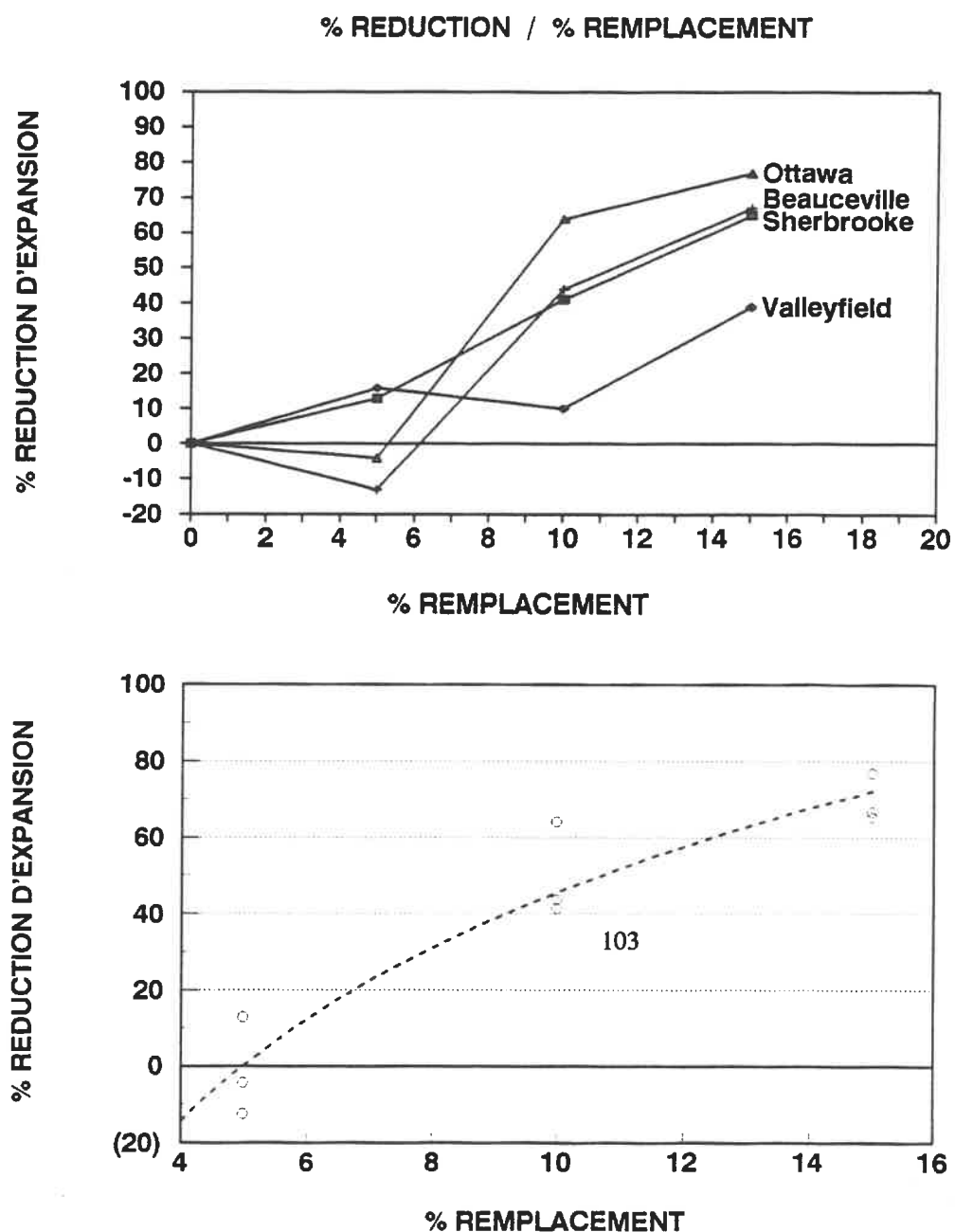


Fig. 76: Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de FSC pour l'essai ASTM C227.

ESSAI ACCELERE / ADDITIF FSC

% REDUCTION / % REMPLACEMENT

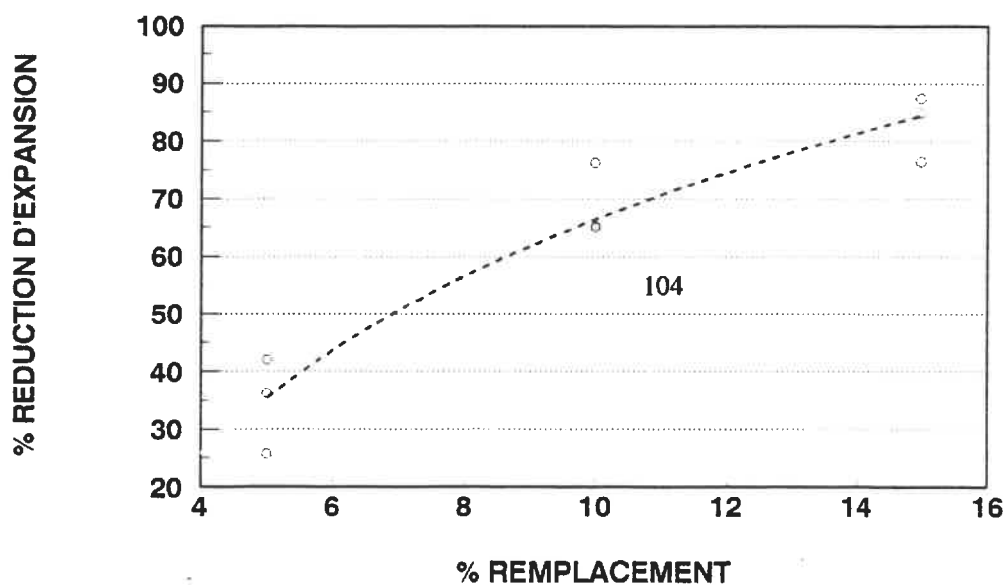
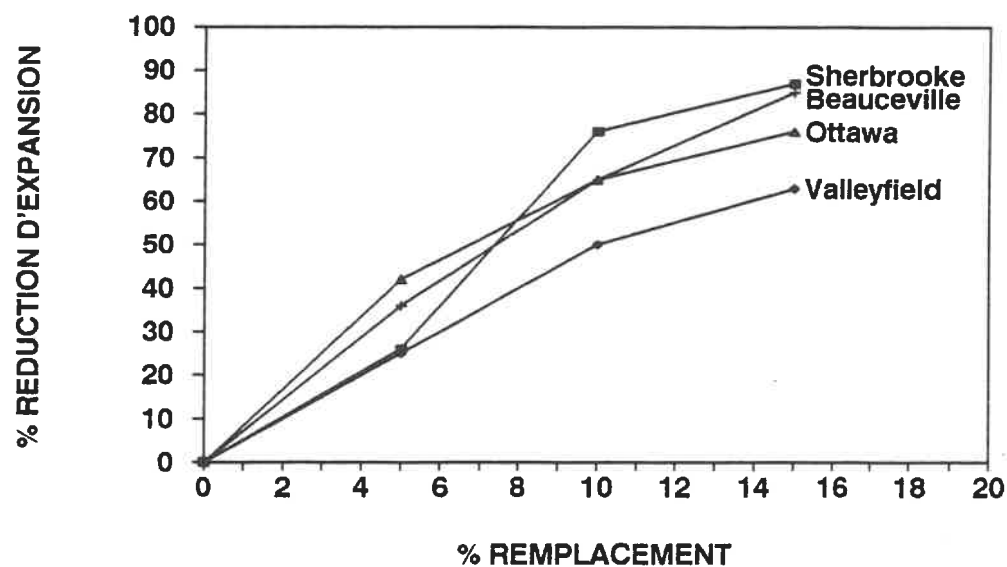


Fig. 77: Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de FSC pour l'essai accéléré.

ESSAI ASTM C-227 / ADDITIF LSG

% REDUCTION / % REMPLACEMENT

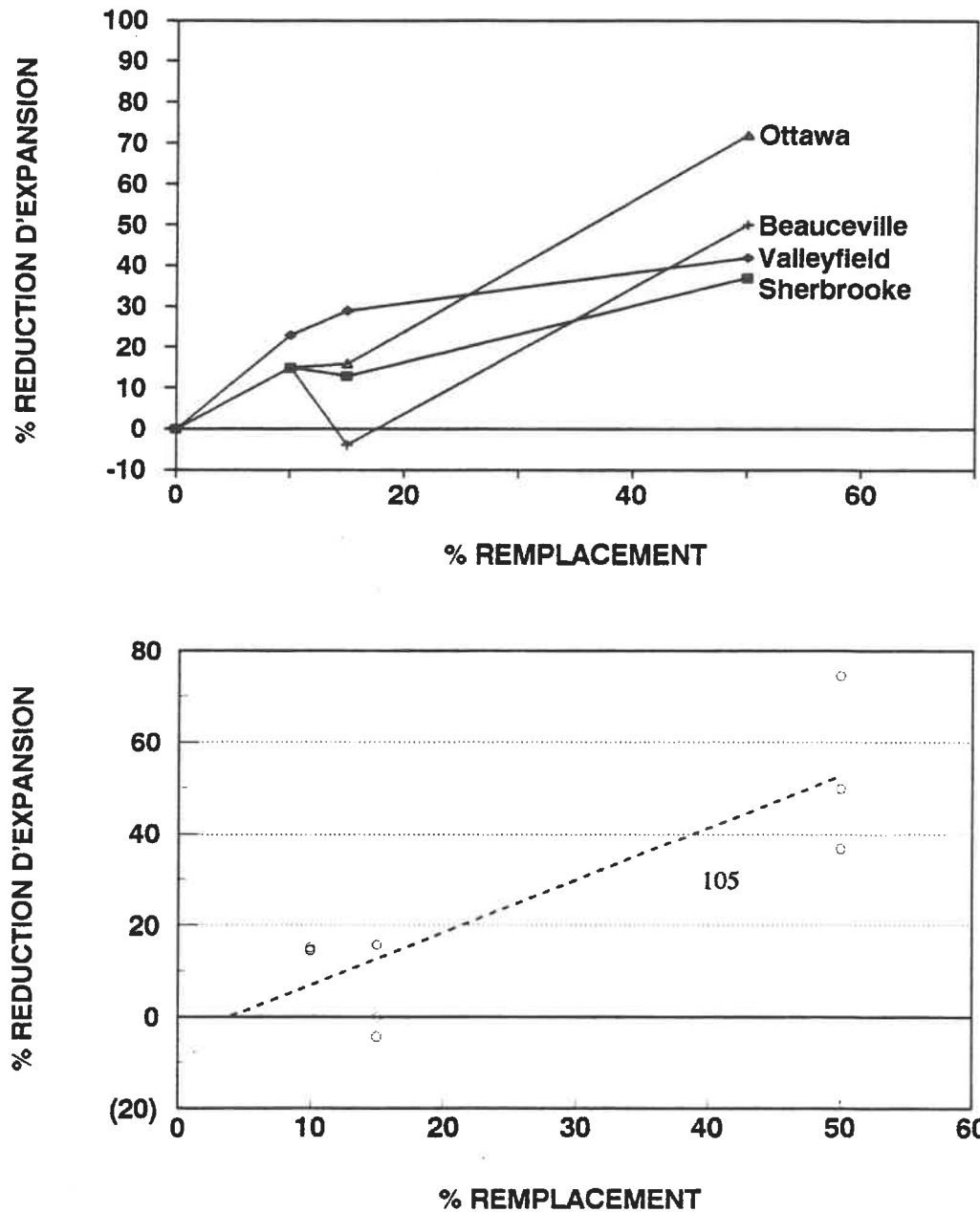


Fig. 78: Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de LSG pour l'essai ASTM C227.

ESSAI ACCELERE / ADDITIF LSG

% REDUCTION / % REMPLACEMENT

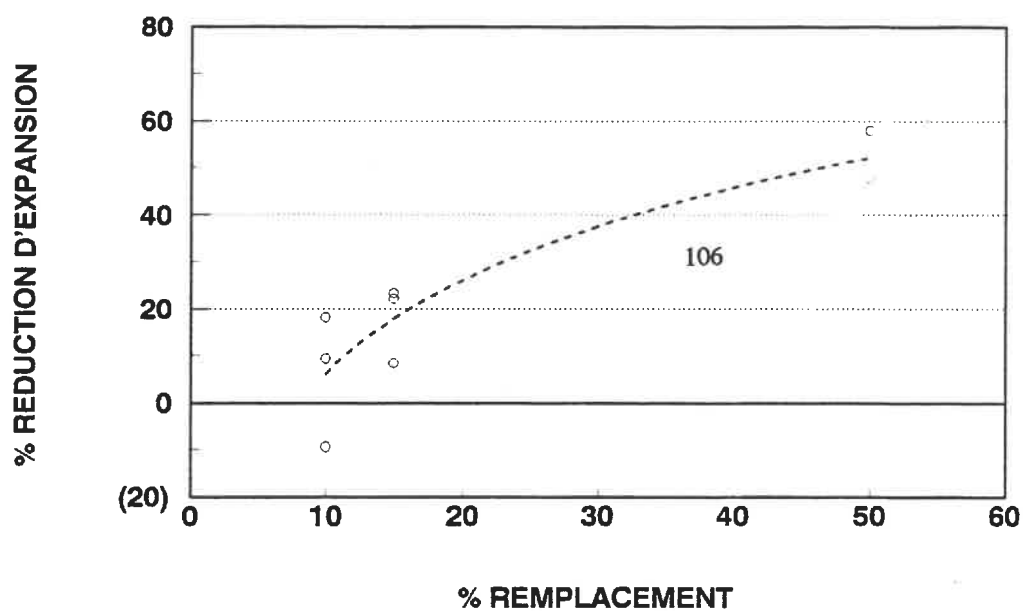
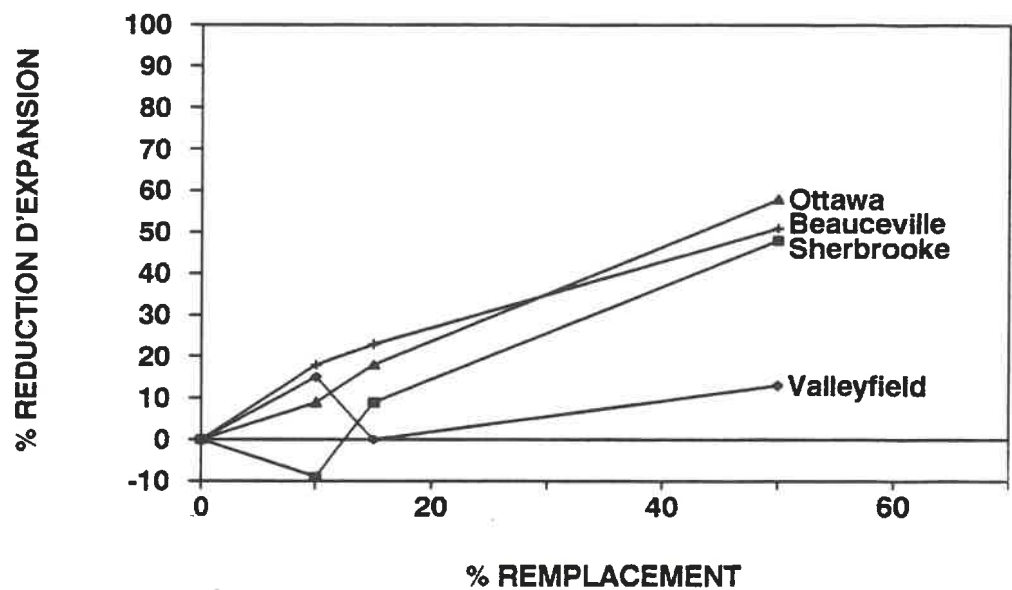


Fig. 79: Graphique et régression des réductions d'expansion versus les pourcentages de remplacement de LSG pour l'essai accéléré.

7.8 SOMMAIRE DES RÉSULTATS

- Le faciès dolomitique de Valleyfield utilisé n'est pas réactif aux alcalis d'après les résultats des deux essais.

- La réactivité du calcaire d'Ottawa n'est pas détectée par l'essai ASTM C227. Par contre, un remplacement de 70% de LSG n'est pas suffisant d'après l'essai accéléré pour rendre le granulat inoffensif aux alcalis. Un remplacement de 15% de FSC est nécessaire pour réduire l'expansion sous la limite permise.

- La réactivité du tuf de Beauceville n'est pas détectée par l'essai ASTM C227. Avec l'essai accéléré, un remplacement de 50% de LSG n'est pas suffisant pour réduire l'expansion sous une limite acceptable. Par contre, un remplacement de 15% de FSC rend le granulat "inoffensif" aux alcalis.

- L'essai ASTM C227 n'a pas détecté la réactivité du schiste de Sherbrooke. L'essai accéléré démontre qu'un remplacement de 5% seulement de FSC et de 50% de LSG sont suffisants pour réduire la réactivité du granulat à des niveaux acceptables, selon les limites fixées.

En vue de rendre la consultation plus aisée, nous avons disposé les équations

des 106 régressions correspondantes aux courbes des divers graphiques précédents sous forme de tableau (voir tableau 2):

Chaque courbe est numérotée, chaque variables (a et b) et le type de régression relative à chacune des courbes y est inscrits.

Les équations ont été regroupées en groupes correspondants aux numéros des figures où sont dessinées les courbes (voir colonne "graph").

Le terme " r^2 " est le coefficient de détermination et les variables a et b caractérisent l'aspect des courbes des régressions selon les divers types d'équation:

Linéaire (lin) : $y = ax + b$

Logarithmique (log) : $y = a + b \ln x$

Puissance (pui) : $y = ax^b$

Exponentielle (exp) : $y = ae^{bx}$

Le nombre de points utilisés pour le calcul des régressions est indiqué dans la colonne "nb".

TABLEAU 2: ÉQUATIONS DES RÉGRESSIONS

No	graph	type	a	b	"r ² "	nb
1	25	lin	0.0064	0.0005	0.9793	7
2	25	lin	-0.0046	0.0005	0.9581	7
3	25	lin	0.0001	0.0002	0.9010	7
4	25	lin	-0.0009	0.0002	0.9367	7
5	26	log	-0.0854	0.1740	0.9970	6
6	26	lin	-0.0130	0.0170	0.9888	7
7	26	pui	0.0021	1.6170	0.9404	6
8	26	pui	0.0020	2.4300	0.9864	6
9	30	lin	0.0064	0.0005	0.9793	7
10	30	lin	0.0011	0.8309	0.9544	7
11	30	pui	0.0008	0.9222	0.9686	6
12	30	pui	0.0013	0.8130	0.9494	6
13	30	log	-0.0095	0.0071	0.7637	6
14	30	log	-0.0044	0.0056	0.9234	6
15	31	log	-0.0854	0.1740	0.9970	6
16	31	pui	0.0518	0.7556	0.9799	6
17	31	pui	0.0492	0.7471	0.9940	6
18	31	log	-0.0840	0.1424	0.9838	6
19	31	lin	-0.0028	0.0125	0.9826	7
20	31	pui	0.0046	1.2780	0.9924	6
21	35	lin	0.0064	0.0005	0.9793	7
22	35	exp	0.0184	0.0073	0.9157	6
23	35	exp	0.0179	0.0055	0.9320	6
24	35	exp	0.0197	0.0052	0.9224	6

No	graph	type	a	b	"r ² "	nb
25	36	log	-0.0854	0.1740	0.9970	6
26	36	log	-0.1253	0.1908	0.9810	7
27	36	lin	-0.0243	0.0347	0.9933	7
28	36	lin	-0.0096	0.0377	0.9859	7
29	40	pui	0.0008	0.7927	0.9924	6
30	40	pui	0.0001	1.2945	0.9947	6
31	40	exp	0.0029	0.0124	0.9967	6
32	40	pui	0.00--	2.4024	0.9401	6
33	41	log	-0.2110	0.1967	0.6842	6
34	41	lin	-0.0132	0.0177	0.9894	7
35	41	lin	-0.0225	0.0107	0.9201	7
36	41	lin	-0.0112	0.0054	0.8838	7
37	45	pui	0.0008	0.7927	0.9924	6
38	45	pui	0.0017	0.5984	0.7491	6
39	45	pui	0.0014	0.6762	0.9651	6
40	45	pui	0.0025	0.4407	0.9851	6
41	46	log	-0.2110	0.1967	0.6842	6
42	46	log	-0.0780	0.1384	0.9960	6
43	46	log	-0.0630	0.1259	0.9941	6
44	46	log	-0.0297	0.0773	0.9973	6
45	50	lin	0.0068	0.0068	0.8581	7
46	50	log	-0.0430	0.0153	0.9669	6
47	50	log	-0.0390	0.0122	0.9479	6
48	50	pui	0.0001	1.2261	0.9591	5
49	51	lin	-0.0055	0.0128	0.9924	7
50	51	lin	-0.0143	0.0102	0.9666	7
51	51	lin	-0.0101	0.0041	0.8546	7
52	51	pui	0.0008	1.3182	0.9919	6
53	55	lin	-0.0166	0.0081	0.9586	6
54	55	log	-0.0210	0.0112	0.8677	6
55	55	log	-0.0197	0.0109	0.9203	6
56	55	pui	0.0066	0.2825	0.9417	6

No	graph	type	a	b	"r ² "	nb
57	56	lin	0.0055	0.0128	0.9924	7
58	56	lin	-0.0054	0.0139	0.9877	7
59	56	lin	-0.0045	0.0116	0.9909	7
60	56	pui	0.0092	0.8691	0.9904	6
61	60	pui	0.0057	0.3046	0.7286	6
62	60	exp	0.0092	0.0058	0.9246	6
63	60	log	-0.0219	0.0089	0.9061	6
64	60	log	-0.0253	0.0089	0.8753	6
65	61	lin	-0.0025	0.0037	0.9760	7
66	61	lin	-0.0010	0.0026	0.9911	7
67	61	lin	-0.0044	0.0021	0.9057	7
68	61	lin	-0.0033	0.0019	0.8791	7
69	65	pui	0.0057	0.3046	0.7286	6
70	65	log	-0.0166	0.0081	0.9586	6
71	65	log	-0.0144	0.0073	0.9361	6
72	65	log	-0.0148	0.0067	0.9239	6
73	66	lin	-0.0025	0.0037	0.9760	7
74	66	pui	0.0013	1.3134	0.7769	6
75	66	lin	0.0005	0.0033	0.9732	7
76	66	lin	0.0033	0.0027	0.9788	7
77	68	lin	0.0098	0.0005	0.9830	7
78	68	lin	-0.0039	0.0003	0.9559	7
79	68	pui	0.0017	0.6967	0.9801	6
80	68	pui	0.0059	0.4034	0.9492	6
81	69	log	-0.0854	0.1744	0.9974	6
82	69	pui	0.0016	1.7964	0.9891	6
83	69	log	-0.0505	0.1129	0.9705	6
84	69	lin	-0.0124	0.0342	0.9880	7
85	70	pui	0.0008	0.7927	0.9924	6
86	70	lin	-0.0062	0.0002	0.9895	7
87	70	lin	0.0076	0.0002	0.9435	7

No	graph	type	a	b	"r ² "	nb
88	71	exp	0.0033	0.3287	0.8760	6
89	71	lin	-0.0264	0.0121	0.9927	7
90	71	log	-0.0566	0.1138	0.9970	6
91	72	lin	0.0105	0.0002	0.8452	7
92	72	lin	-0.0028	0.0002	0.9568	7
93	72	pui	0.0039	0.4253	0.9312	6
94	73	lin	-0.0101	0.0132	0.9919	7
95	73	lin	-0.0159	0.0061	0.9781	7
96	73	log	-0.0430	0.0661	0.9663	6
97	74	pui	0.0058	0.3047	0.7286	6
98	74	lin	0.0038	0.0002	0.9451	7
99	74	pui	0.0012	0.5948	0.9406	6
100	75	log	-0.0047	0.0039	0.9739	6
101	75	log	-0.0054	0.0025	0.9733	6
102	75	log	-0.0067	0.0165	0.9915	6
103	76	log	-104.9648	65.4012	0.9069	9
104	77	log	-35.8155	44.3820	0.9215	9
105	78	lin	- 4.3769	1.1426	0.7291	9
106	79	log	-59.3730	28.5063	0.8538	9

CHAPITRE 8

RÉSULTATS DES OBSERVATIONS EFFECTUÉES AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE

8.1 LES PRODUITS DE RÉACTIONS

Le gel calco-alcalin-siliceux formé à la suite de la réaction alcalis-granulats est facilement identifiable par un pétrographe averti. Ce gel se développe généralement dans des zones de sous-pressions où son épanchement peut se faire plus aisément. Ainsi, lors d'un examen pétrographique d'un béton affecté par ce type de réaction, il est courant d'observer ce gel à l'interface granulats-pâte et/ou dans les pores du béton (Le Roux et Cador 1984).

Nous avons effectué des examens pétrographiques sur les barres de mortier soumises aux deux types de cure. La présence de gel a été observée seulement dans les vacuoles du mortier. L'importance du gel dans celles-ci était généralement proportionnelle aux différents taux de remplacement des additifs.

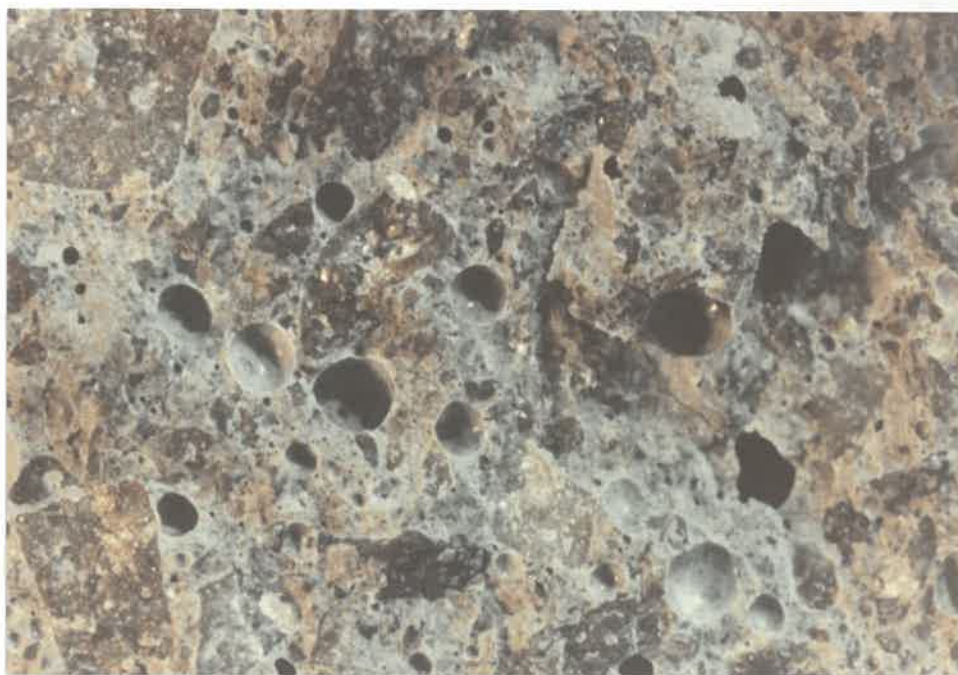


Fig. 80: Photographie de pores d'un mortier confectionné avec le schiste de Sherbrooke et 15% de fumée de silice condensée. Absence de gel de silice. (X 10)

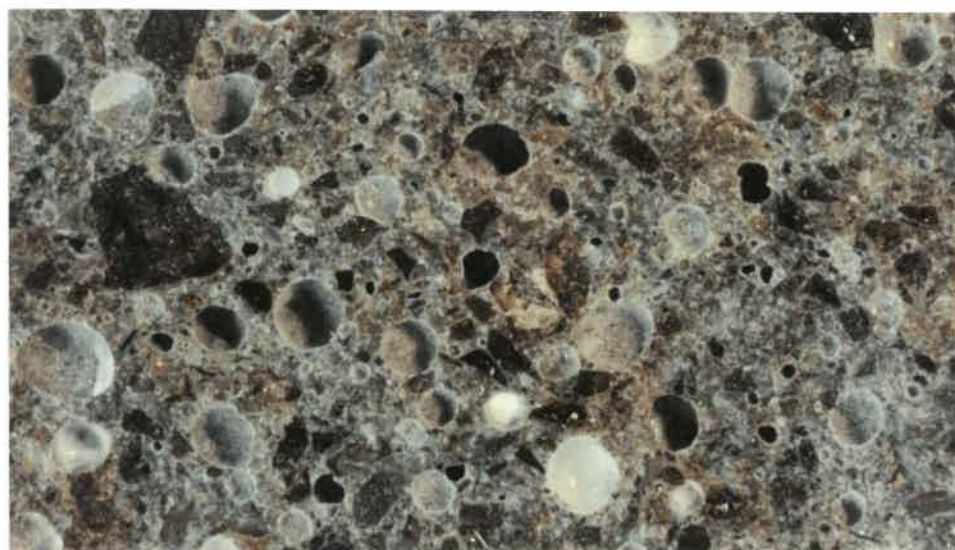


Fig. 81: Photographie de pores remplis de gel de silice. Mortier confectionné avec le schiste chloriteux de Sherbrooke et sans additifs.(X 10)

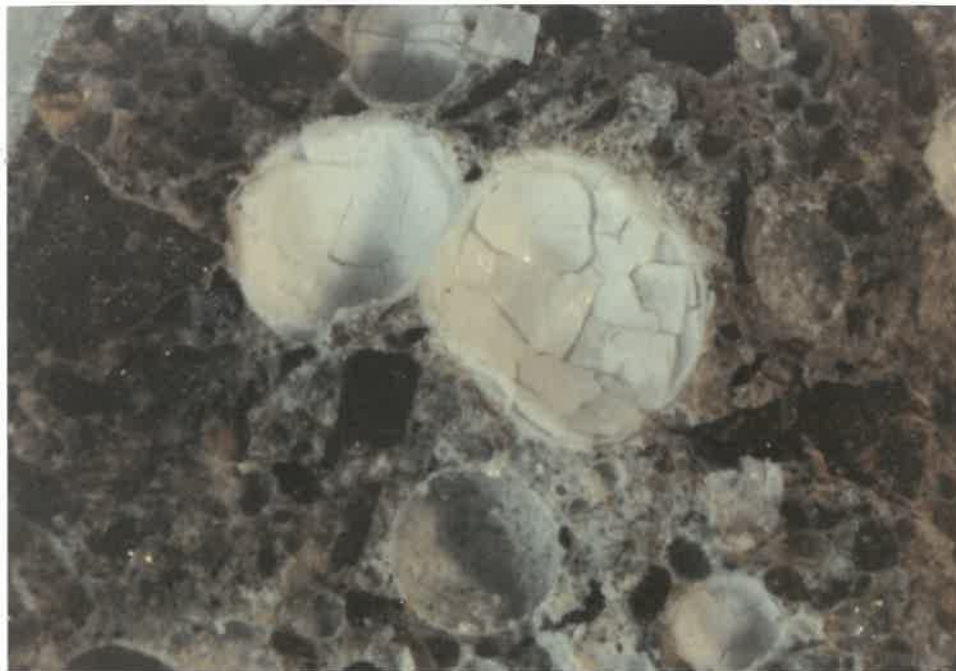


Fig. 82: Vue rapprochée d'un pore remplis de gel de silice. Présence de fissures de dessiccation. (X 40)

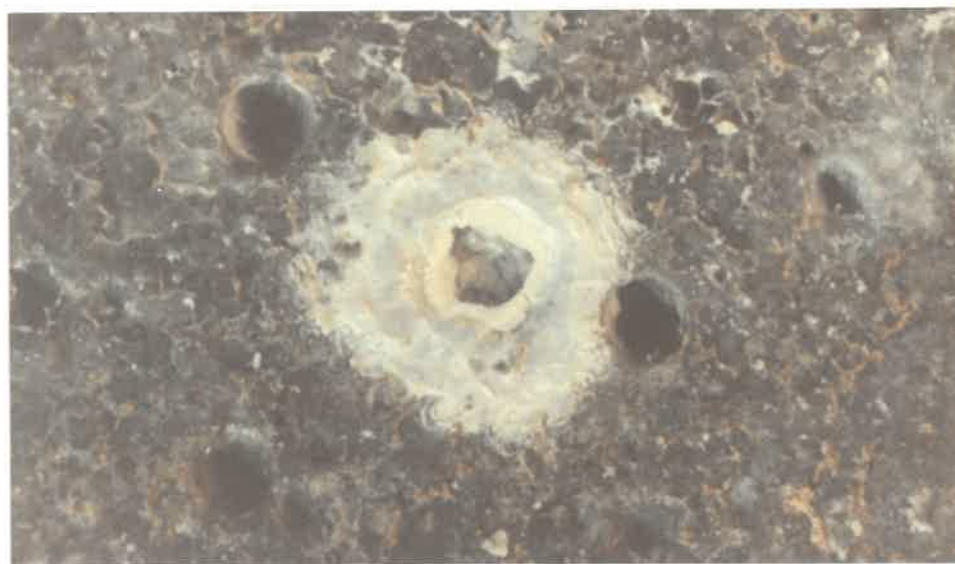


Fig. 83: Exsudation du gel de silice sur les surfaces externes des barres de mortier.(X 20)

Une quantité moindre de gel est observée lorsque le taux de remplacement est élevé. De même, nous avons noté un dépôt blanchâtre à la surface des barres de mortier et ce, pour les deux types d'essais. Ce dépôt est aussi proportionnel à la quantité d'additifs présents dans les mélanges, donc à l'expansion des barres de mortier, i.e. que l'on observe peu de ce dépôt lorsque les allongements des barres sont sous les limites fixées.

Par contre, l'examen pétrographique ne permet pas de vérifier la composition chimique du gel. Comme nous l'avons déjà mentionné, le taux d'épanchement du gel est fonction du rapport Ca/Si. Pour cette raison, il devient important de bien définir la composition des divers gels rencontrés. Dans le but d'y parvenir, nous avons effectué des observations à l'aide d'un microscope électronique à balayage JEOL JSM-820 équipé d'un spectromètre à dispersion d'énergie au silicium dopé au lithium TRACOR X-RAY. La limite de détection de ce type d'appareil est le sodium. Le microscope est relié à un ordinateur TRACOR NORTTHERN TN 2000 permettant l'analyse des données.

Nous avons procédé à l'analyse des échantillons confectionnés avec le calcaire d'Ottawa et avec les différents additifs sous divers pourcentages de remplacement. Les observations ont été faites pour les deux types d'essais afin de comparer la nature des produits de réaction.

8.2 RÉSULTATS

A la suite de nos observations, nous en sommes venus aux mêmes conclusions que Blanchette en 1989 lors de ses essais:

- " Dans les deux cas, (essais ASTM C227 et accéléré) les gels présentent une morphologie et une composition chimique identiques."
- La cure de l'essai accéléré à 80° C ne fait que catalyser la réaction sans modification du processus de la réaction (Blanchette, 1989, Davies et Oberholster, 1986).

Les photos prises au MEB montrent un aspect bosselé finement fissuré. Cette réticulation est caractéristique d'un retrait de dessiccation, ce qui laisse supposer une teneur en eau importante (Deloye, 1983). Les fissures de retrait traversent le gel comme s'il n'y avait aucune individualité au sein du gel. Une telle constatation confirme bien que la fissuration est postérieure à la formation du gel et probablement liée à la méthode de présentation de l'échantillon pour l'examen au microscope électronique à balayage.

De même, en ce qui concerne les effets des additifs ajoutés aux mélanges, nous arrivons aux mêmes conclusions que Durand lors de ses travaux en 1988:

- "Les échantillons contenant de la FSC présentent les mêmes produits de réaction que les échantillons de contrôle sauf qu'ils sont généralement moins abondants ou à peu près absents,...".

- " La même remarque s'applique aux échantillons contenant du LSG, mais les quantités de produits de réaction sont plus grandes que pour ceux contenant de la FSC, voire même aussi abondantes que dans les échantillons de contrôle,...".

Lors de l'observation au microscope électronique à balayage des échantillons confectionnés avec le carbonate de lithium, nous avons noté une variation de la morphologie du gel. En effet, de fines aiguilles absentes dans les autres échantillons sont présentes à la surface du gel. Malheureusement, la limite de détection du microscope (le sodium) ne nous a pas permis d'identifier si ces aiguilles renfermaient du lithium. Une identification par diffraction X ne fut pas envisagée en raison de la grande finesse et la faible abondance de ces aiguilles. Enfin, la présence de celles-ci n'a pas été observées dans les échantillons soumis à la cure à 38° C de l'essai ASTM C227.

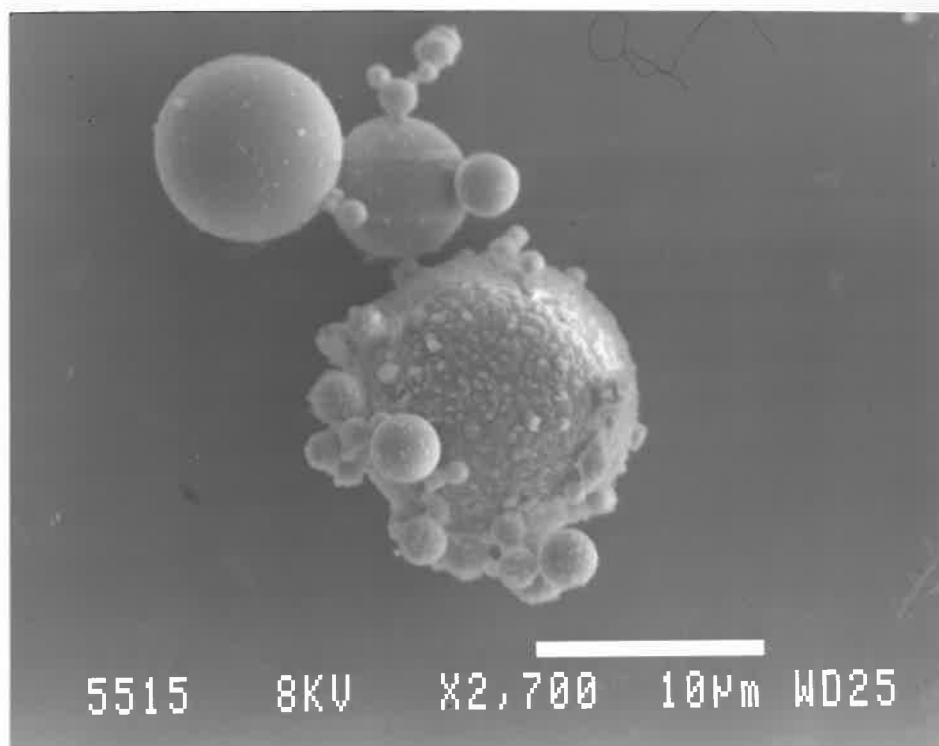


Fig. 84: Photographie prise au MEB illustrant de la fumée de silice condensée. (X 2,700)

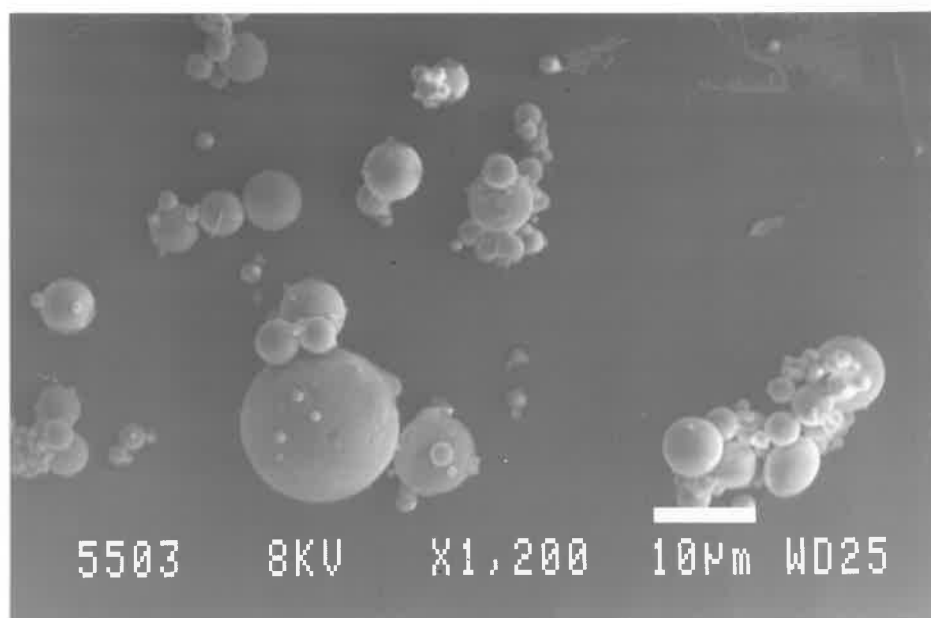


Fig. 85 : Photographie prise au MEB illustrant de la fumée de silice condensée. (X 1,200)

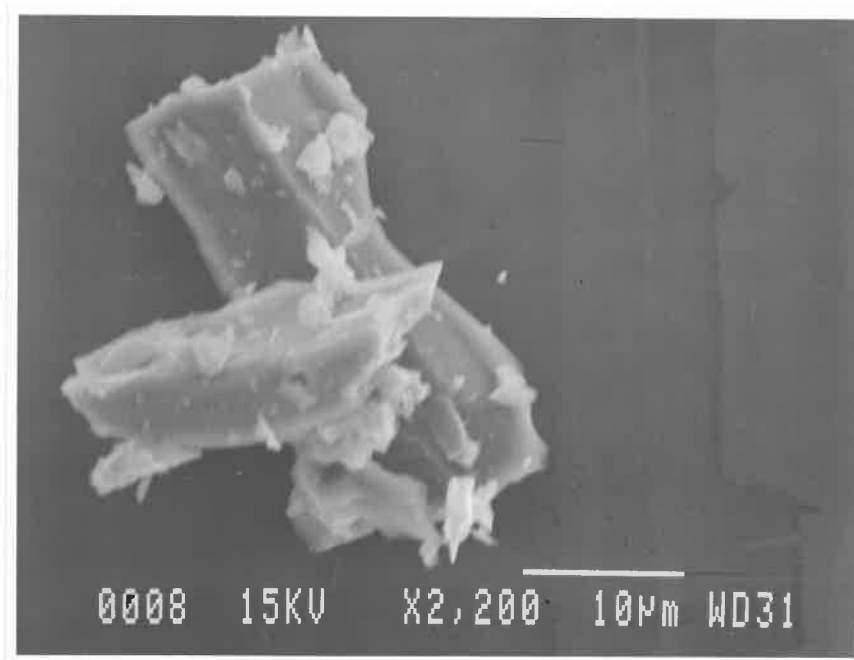


Fig. 86: Photographie prise au MEB d'un cristal de laitier silicaté granulé. (X 2,200)

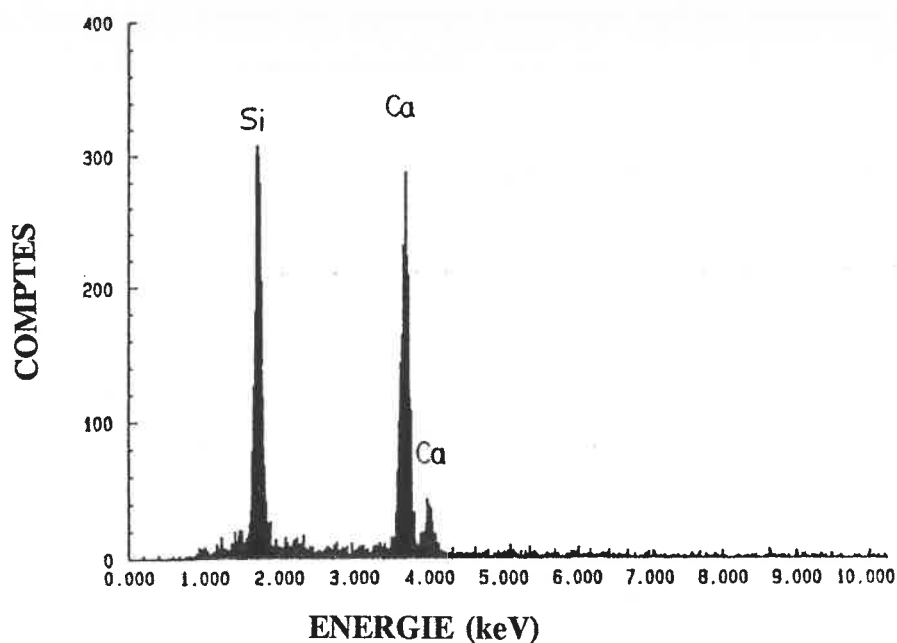


Fig. 87: Spectre de l'analyse par fluorescence-X du laitier de la figure précédente.

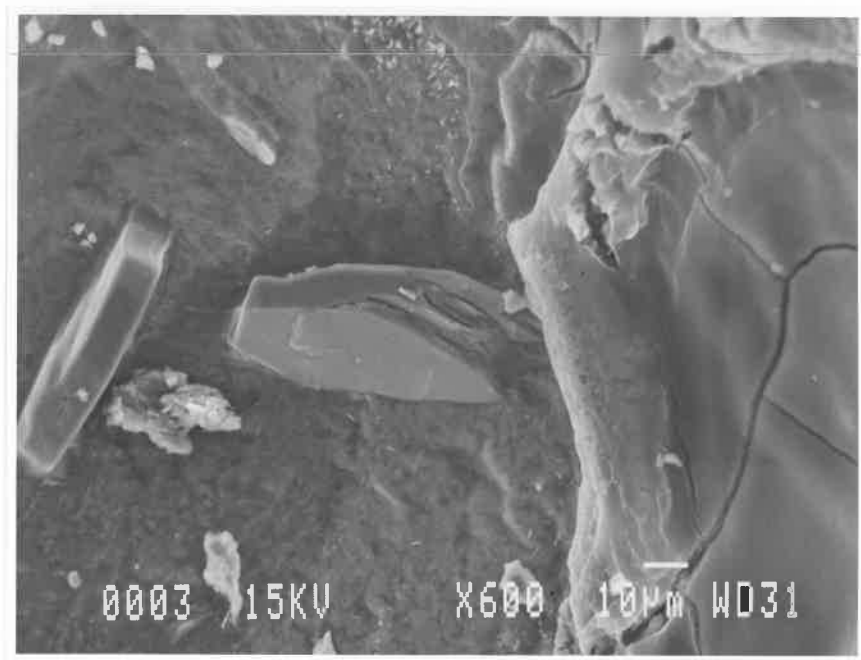


Fig. 88: Photographie prise au MEB d'un cristal de portlandite dans le mortier. (X 600)

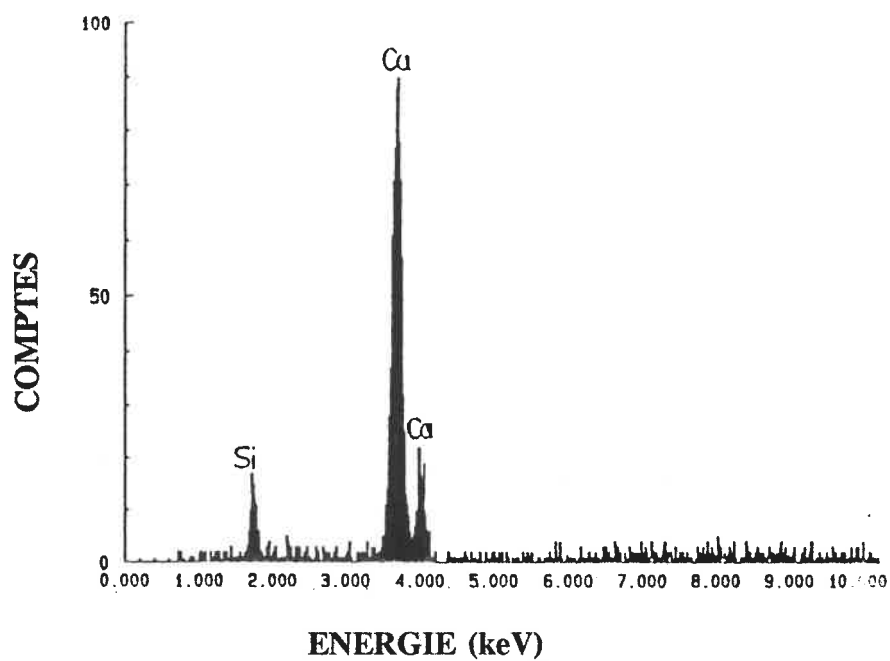


Fig. 89: Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la portlandite de la figure précédente.

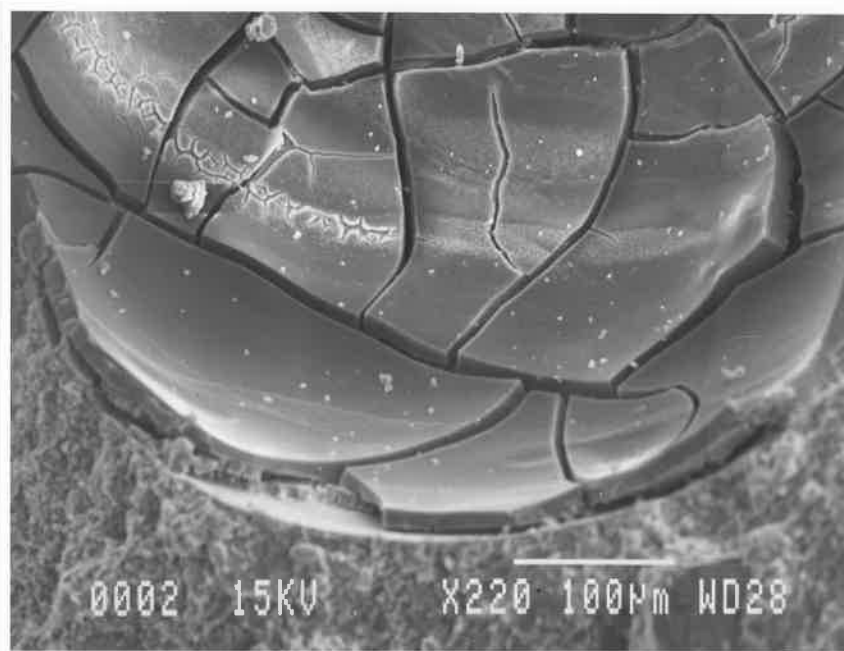


Fig. 90: Photographie prise au MEB illustrant des "écailles" de gel de silice formé dans un pore. (X 220)

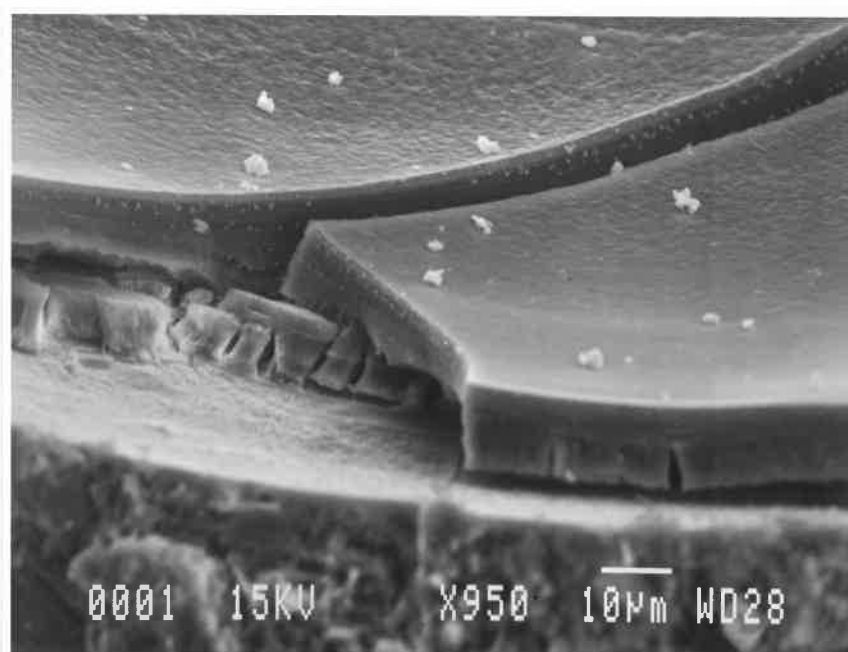


Fig. 91: Photographie prise au MEB d'une vue rapprochée de la photographie précédente. (X 950)

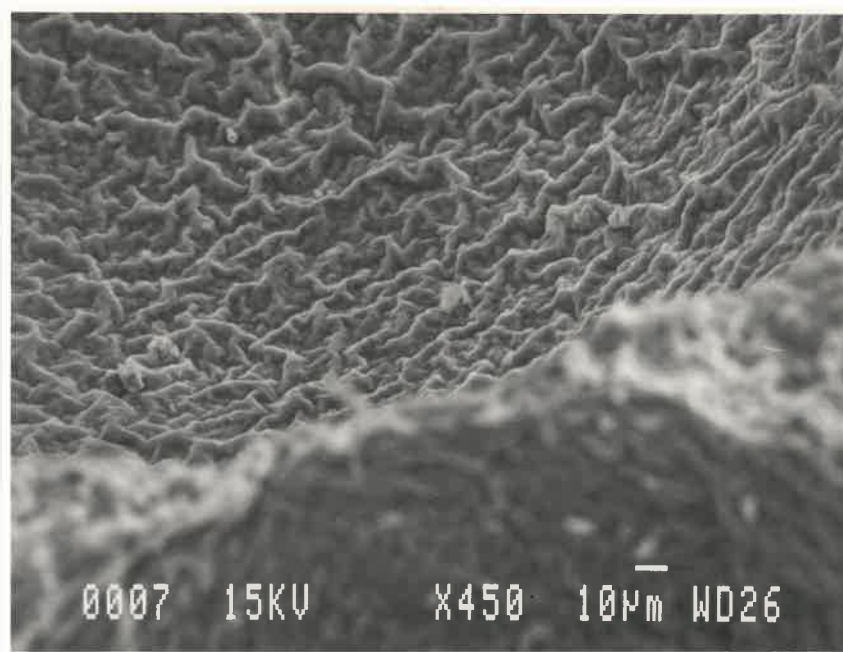


Fig. 92: Photographie prise au MEB d'un gel de silice de texture "frippée". (X 450)

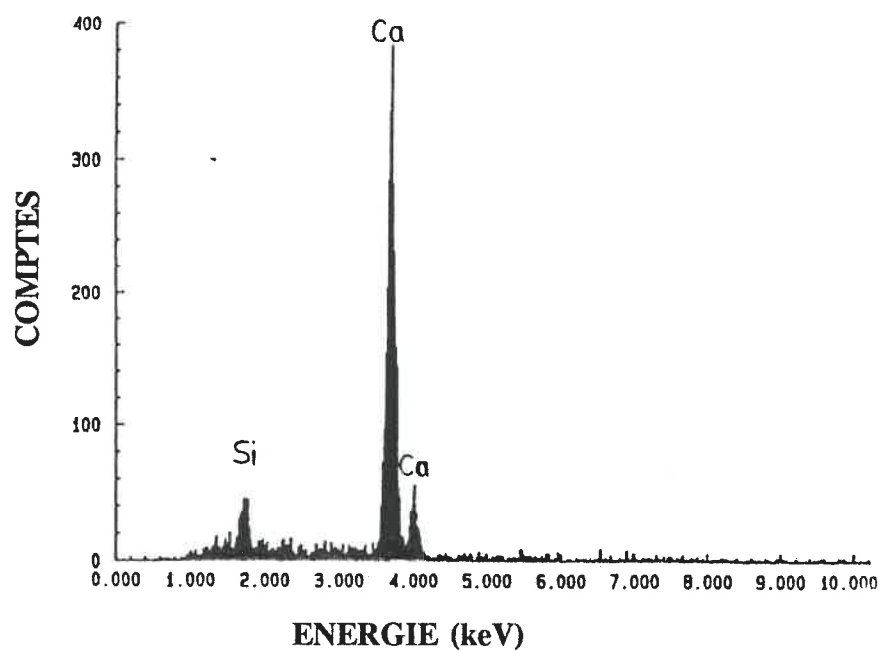


Fig. 93: Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel de la photographie précédente.

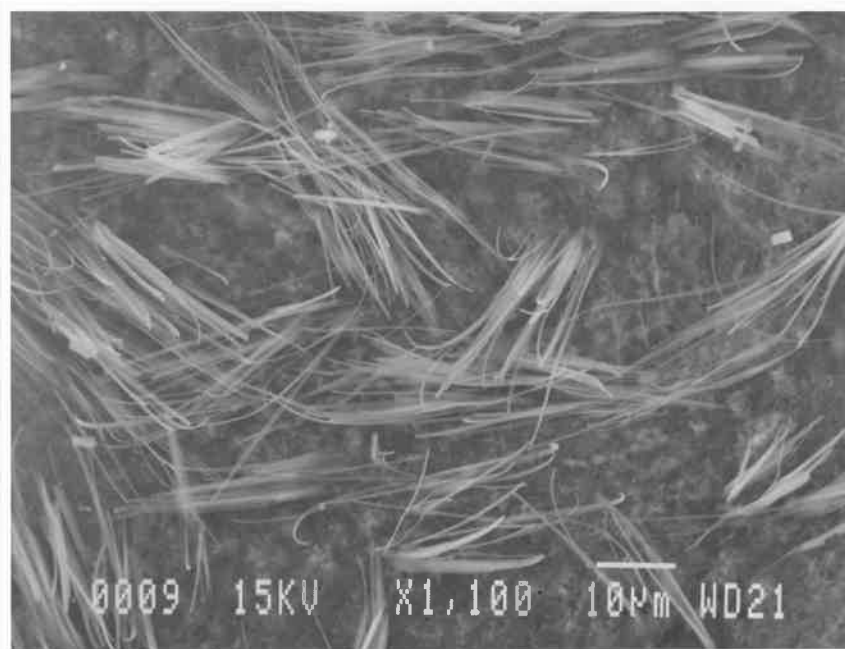


Fig. 94: Photographie prise au MEB montrant les "aiguilles" présentes sur le gel siliceux. Echantillon confectionné avec du carbonate de lithium. (X 1,100)

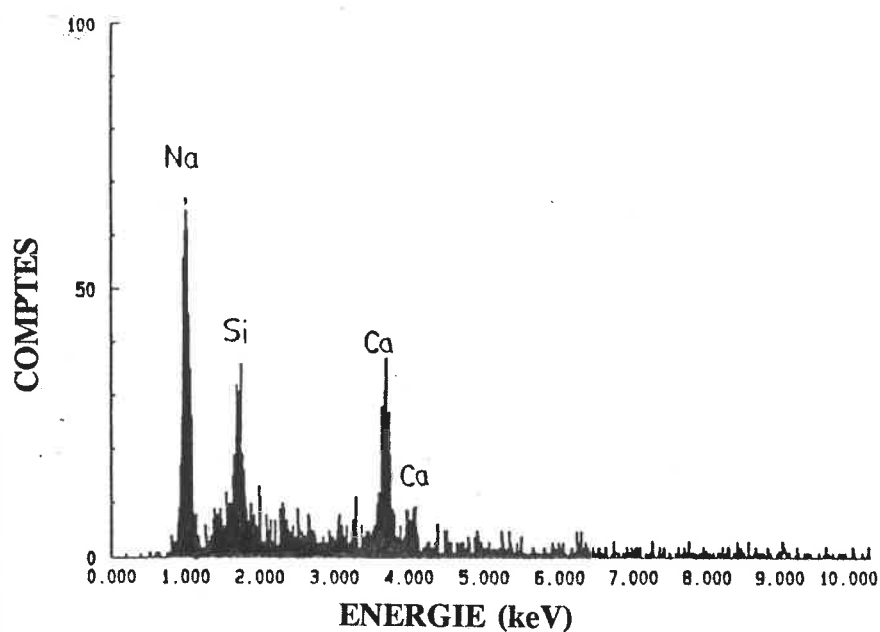


Fig. 95: Spectre de l'analyse par fluorescence-X des "aiguilles" de la photographie précédente.

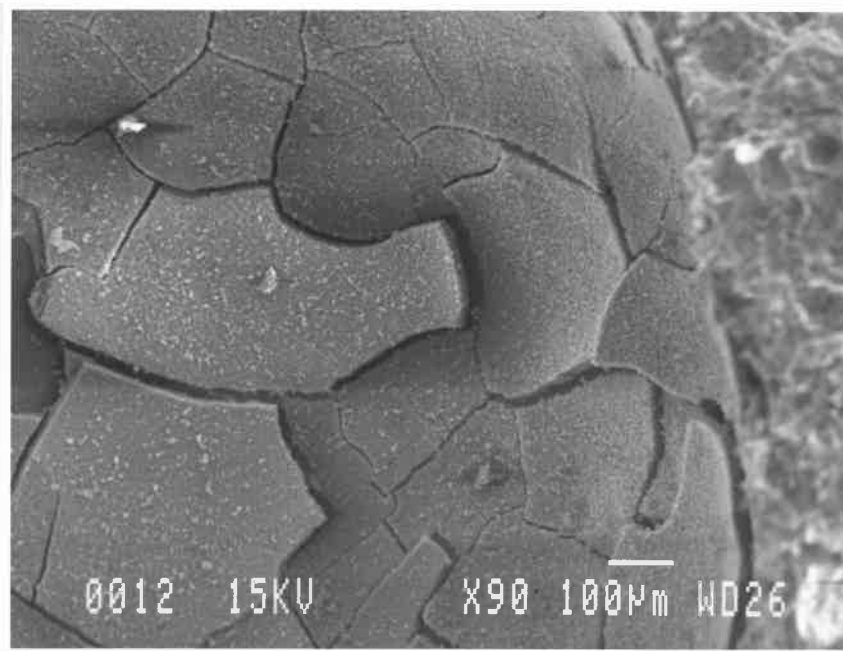


Fig. 96: Photographie prise au MEB illustrant un gel de silice formé dans un pore du mortier. (X 90)

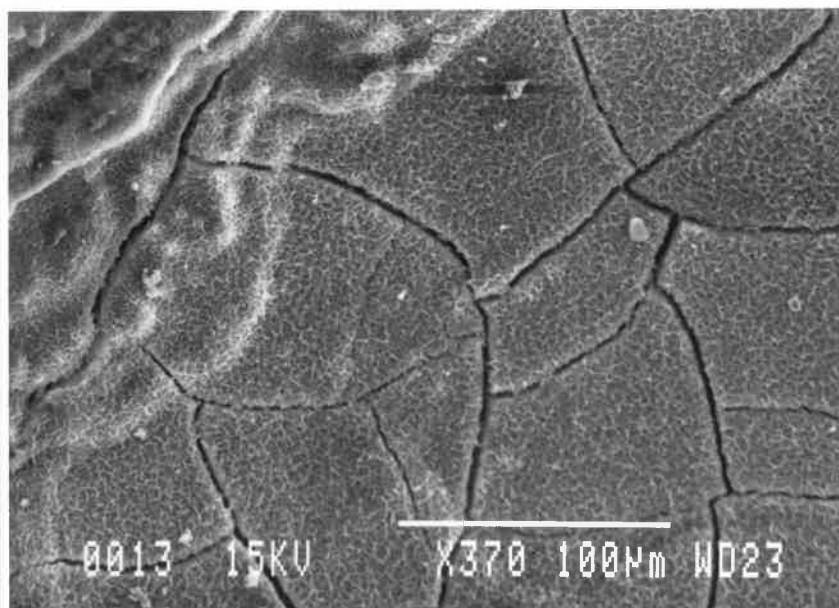


Fig. 97: Photographie prise au MEB d'une vue plus rapprochée de la photographie précédente. (X 370)

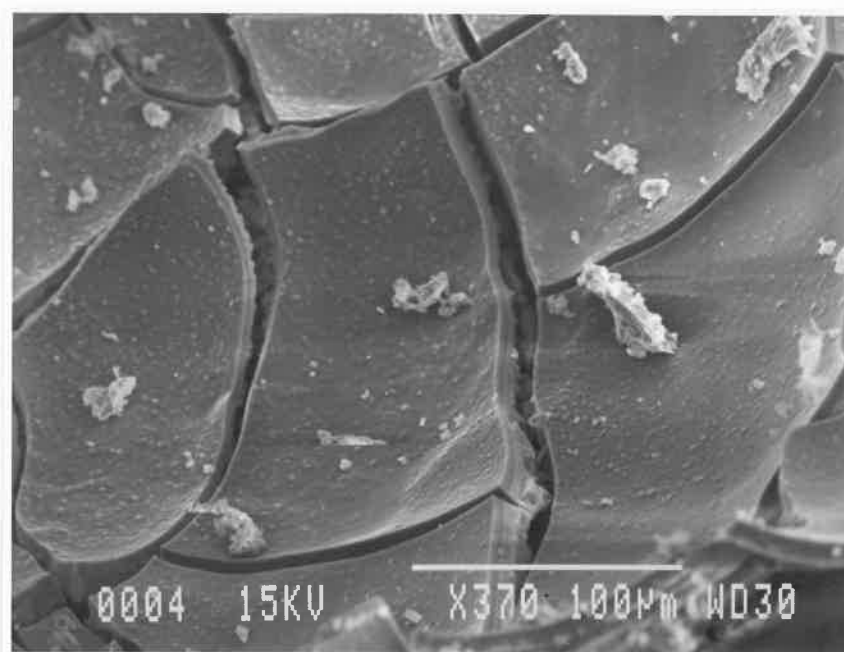


Fig. 98: Photographie prise au MEB "d'écailles" de dessiccation de gel de silice. (X 370)

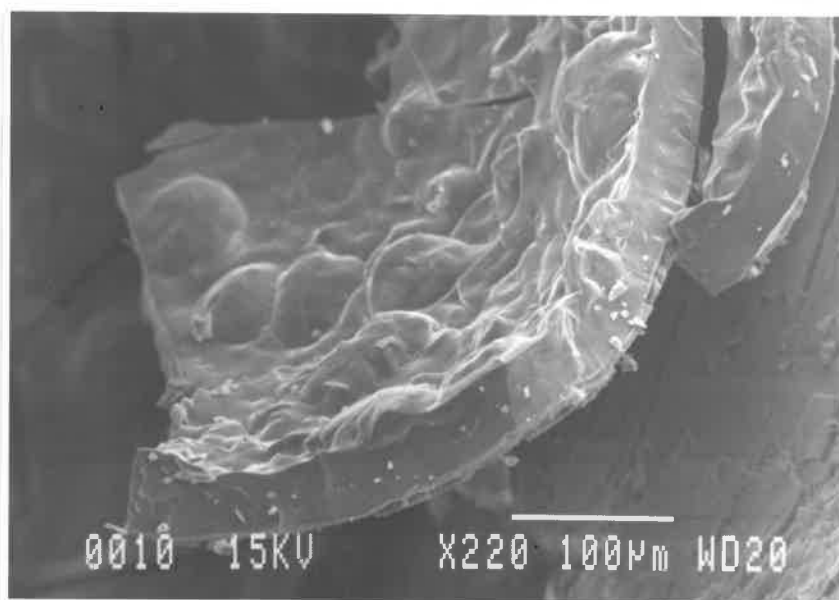


Fig. 99: Photographie prise au MEB d'une vue montrant l'épaisseur des écailles du gel de silice. (X 220)

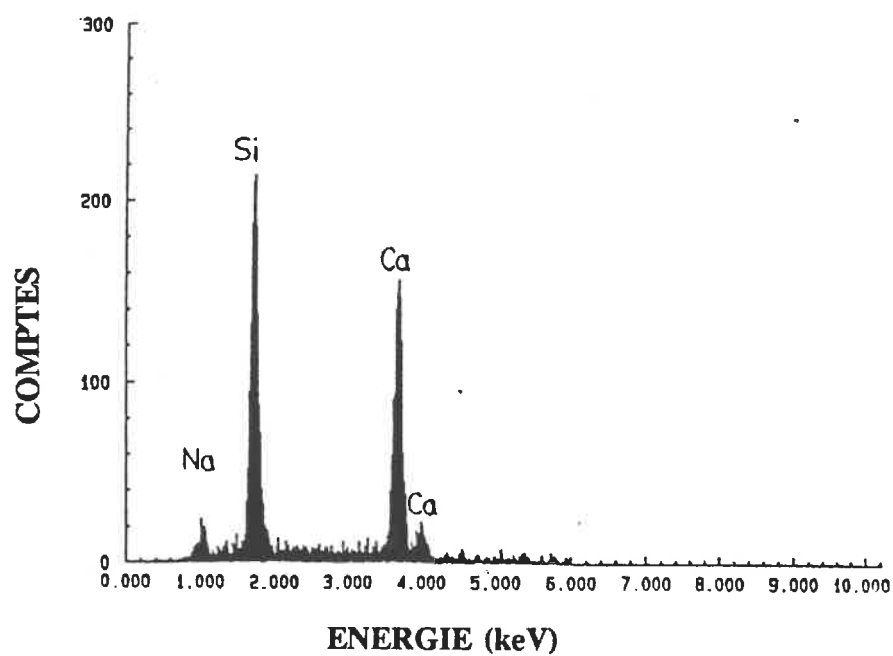


Fig.100: Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la photographie de la figure 98.

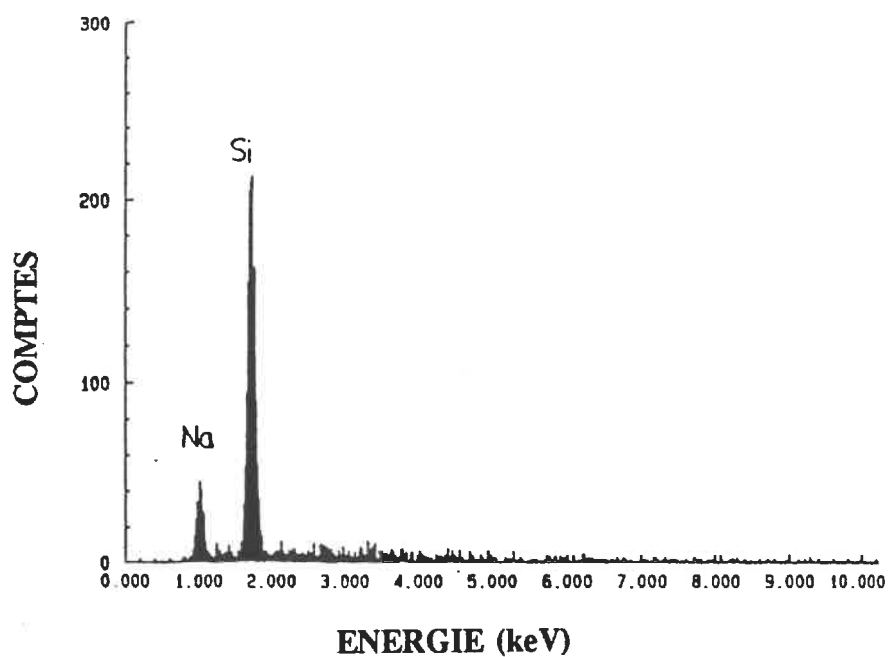


Fig.101: Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la photographie de la figure 99.

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Présentement, il existe plusieurs essais qui peuvent servir à détecter la réactivité des granulats à béton. Tel que nous l'avons vu au chapitre 5, les nouveaux procédés sont souvent très originaux... et rarement convaincants. De plus, malgré sa grande popularité, l'essai ASTM C227 présente quelques faiblesses qui l'empêche de détecter certains granulats réactifs.

Par contre, l'essai accéléré semble faire ses preuves et plusieurs chercheurs travaillent à améliorer ses procédures d'exécution. Puisque la cure s'échelonne sur une période de douze jours, l'industrie du béton a tout à gagner en s'intéressant à cet essai.

Afin de compléter les travaux déjà effectués sur cet essai, nous avons vérifié l'efficacité à contrer la réaction alcalis-granulats si divers additifs sont ajoutés au mortier soumis à la cure de ce nouvel essai.

L'étude visait à observer l'effet pouzzolanique de ces additifs face à la sévérité de la cure proposée. Nous avons de plus effectué le même cheminement avec l'essai ASTM C227 dans le but de suivre l'évolution parallèle de ces deux essais.

Suite aux résultats obtenus, nous pouvons affirmer que les deux principaux additifs utilisés, la fumée de silice et le laitier silicaté, se comportent de façon similaire lors des deux cures différentes:

1 - Les réductions d'expansion sont généralement proportionnelles aux taux de remplacement des additifs. On observe d'ailleurs de meilleures corrélations entre les différents taux de remplacement des additifs pour l'essai accéléré.

2 - Les corrélations entre les réductions d'expansion et les pourcentages de remplacement des additifs obtenues avec l'essai ASTM C227 sont aussi généralement bonnes. Ce qui nous amène à croire que la cure de cet essai n'est pas si mauvaise mais que c'est plutôt la limite permise qui semble inadéquate. De même, Swamy et Al-Asali (1986) arrivent à une conclusion semblable après avoir étudié les résistances mécaniques de mortiers atteints par la réaction alcalis-granulats. Il leur est apparu que l'importance de la perte de la résistance en compression et en flexion ainsi qu'une forte diminution du module d'élasticité des

mortiers ayant atteint 0,10% d'expansion est inadéquate pour la conception de structures de béton. Ils suggèrent d'abaisser cette limite sans toutefois se prononcer sur une valeur adéquate. Stark (1979) est du même avis mais propose plutôt que l'essai s'effectue sur une période de douze mois. Ainsi, les résultats généralement obtenus avec l'essai ASTM C227 seraient, d'après nos observations et d'après plusieurs chercheurs, sous évalués. Ce qui expliquerait que plusieurs granulats reconnus comme réactifs ne soient pas détectés avec cette méthode. Rappelons qu'aucun des trois granulats réactifs de la présente étude n'a été détecté comme tel avec l'essai ASTM C227. Il faut souligner qu'étant peu sévère, cette cure devient très sensible aux variations extérieures tel que noté par Hooton (1987). Celui-ci a démontré que les résultats étaient influencés par le type de contenants utilisés.

Sachant que la limite de l'essai ASTM C227 est inadéquate, nous avons tenté d'évaluer une nouvelle limite. Pour ce faire, nous avons utilisé comme point de référence la limite de l'essai accéléré qui nous semble plus réaliste. Ainsi, nous avons disposé les allongements des barres de mortier sur deux graphiques: un premier graphique illustrant les allongements observés pour tous les mélanges ayant un remplacement de FSC, et un deuxième avec les remplacements de LSG (graphique des figures 102 et 103). Nous avons ensuite déplacé la limite de l'essai ASTM afin d'obtenir deux zones à l'intérieur desquelles on retrouve la majorité

des points. Ces zones correspondent à des champs où les pourcentages d'allongement déterminent des mélanges de mortier "réactifs" ou "non réactifs" pour les deux essais. Fait intéressant, nous avons fixé la limite de l'essai ASTM à une même valeur pour les deux types d'additifs, i.e. à 0.033%. Pour le graphique concernant la FSC, 94% des points sont situés à l'intérieur des deux zones, tandis que cette valeur est de 83% pour le LSG. Cette observation nous indique que la limite actuellement établie pour l'essai ASTM C227, est peut-être trois fois trop élevée...ce qui nous semble considérable.

Afin de distinguer chacun des mélanges sur le graphique des figures 102 et 103, nous avons utilisé la légende suivante:

O : GRANULAT D'OTTAWA

B : GRANULAT DE BEAUCEVILLE

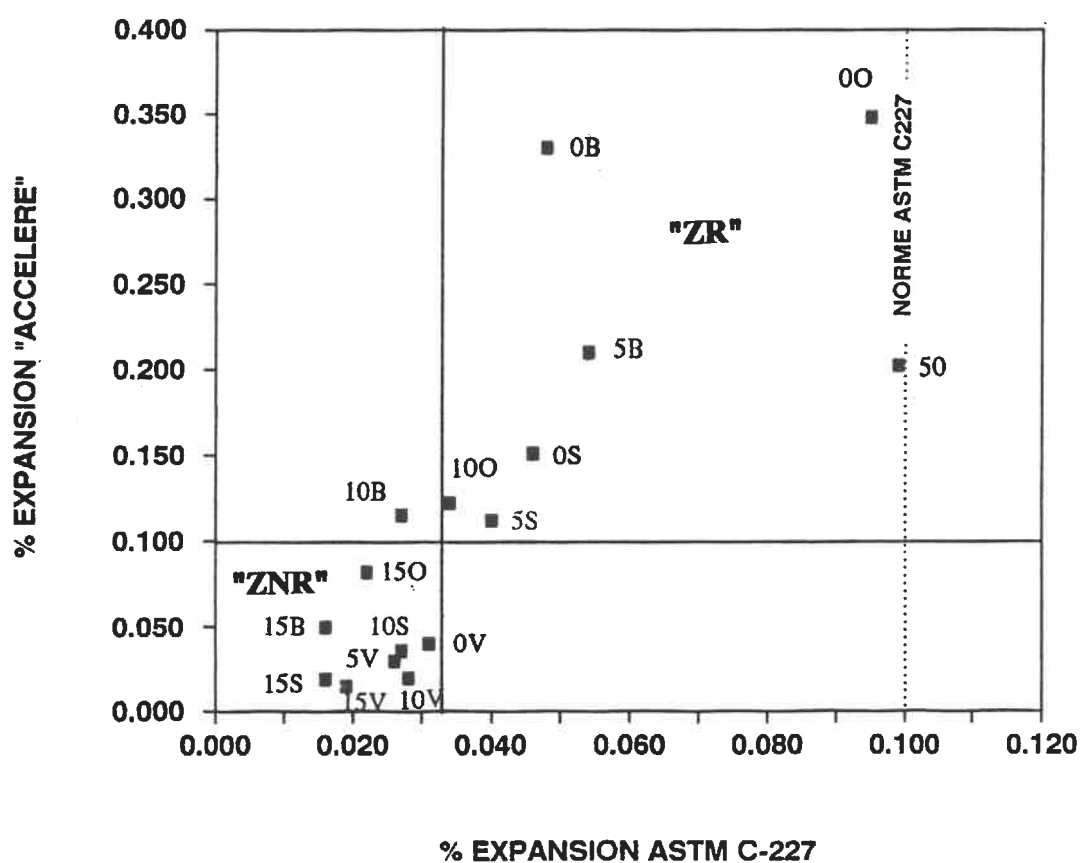
S : GRANULAT DE SHERBROOKE

V : GRANULAT DE VALLEYFIELD

Le chiffre précédant la lettre indique la quantité, en pourcentage, d'additif utilisé dans le mélange.

ESSAI ACCELERE / ESSAI ASTM C-227

EXPANSIONS OBTENUES AVEC ADDITIF FSC (%)



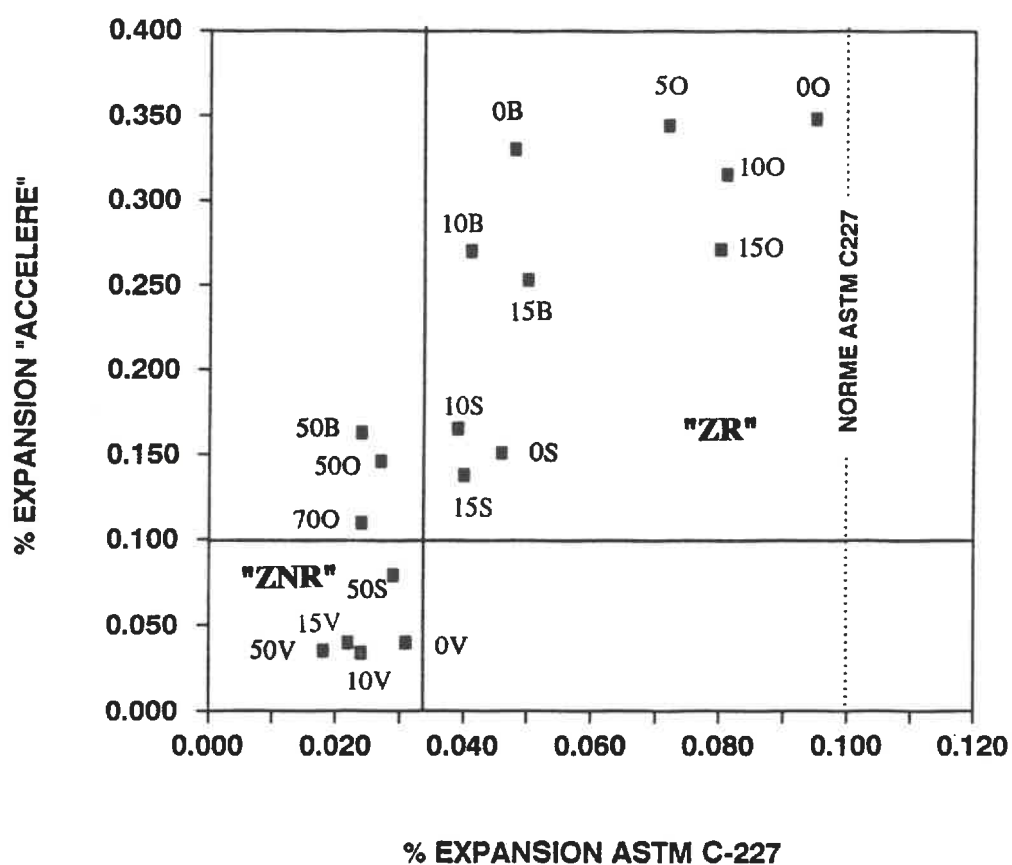
"ZNR": Zone non réactive commune pour les deux essais.

"ZR" : Zone réactive commune pour les deux essais.

Fig. 102: Relation entre les expansions de l'essai ASTM C227 et de l'essai accéléré obtenues avec l'additif FSC pour une "nouvelle" limite de 0.033%. (chiffre = %FSC et lettre = granulat)

ESSAI ACCELERE / ESSAI ASTM C-227

EXPANSIONS OBTENUES AVEC ADDITIF LSG (%)



"ZNR": Zone non réactive commune pour les deux essais.

"ZR" : Zone réactive commune pour les deux essais.

Fig. 103: Relation entre les expansions de l'essai ASTM C227 et de l'essai accéléré obtenues avec l'additif LSG pour une "nouvelle" limite de 0.033%. (chiffre = %LSG et lettre = granulat)

3 - A l'aide d'un microscope électronique à balayage nous avons analysé les produits de réaction obtenus avec les deux genres de cure. Les observations indiquent que les gels produits sont morphologiquement et chimiquement similaires quelque soit le type de cure, le type d'additif et le taux de remplacement de ces additifs. Toutefois, nous ne sommes pas en mesure de déterminer si la cure de l'essai accéléré ne modifie en rien le processus de la réaction avec l'ajout de fumée de silice condensée et/ou de laitier silicaté granulé.

4 - Par contre, des résultats contradictoires ont été obtenus lors de l'utilisation de carbonate de lithium comme additif. Des réductions d'expansion ont été notées avec la cure de l'essai ASTM C227, tandis que nous avons mesuré des augmentations d'expansion pour la cure accélérée. Notons que ce type d'additif est relativement coûteux et rarement utilisé comme additif par l'industrie du béton. Son utilisation demeure encore expérimentale et le processus d'interaction avec les alcalis reste nébuleux. Dans ce sens, les expansions importantes observées avec l'essai accéléré restent inexpliquées. Une interaction hypothétique du lithium avec le sodium de la solution est possible. D'un autre côté, l'utilisation de carbonate de lithium semble augmenter la porosité du mortier, ce qui pourrait se traduire par une infiltration plus facile de la solution de soude. Donc, d'une réaction plus rapide et plus importante entre la solution et les granulats réactifs. De plus, lors de l'observation du gel produit avec la cure

accélérée à l'aide du microscope électronique à balayage, nous avons noté la présence d'un produit de réaction "anormal" et ce, sans pouvoir déterminer la composition chimique de ce gel. Pour le moment, nous considérons que la cure accélérée est inadéquate pour vérifier l'efficacité du carbonate de lithium.

Enfin, nous avons disposé sur les deux graphiques des pages suivantes les résultats des réductions d'expansion des granulats "Ottawa", "Sherbrooke" et "Beauceville" obtenus pour chaque taux de remplacement et, ce, pour les deux types d'essais. Les deux additifs, FSC et LSG, ont été traités séparément. Nous avons intentionnellement omis les valeurs obtenues des réductions d'expansion de la dolomie de Valleyfield pour des raisons de précision. Les faibles expansions mesurées et leur grande marge d'erreur associées à ce granulat en sont les principales raisons.

A l'aide de régressions linéaires, nous avons obtenu des corrélations indiquant qu'un comportement similaire pour les deux essais est observable lorsque l'on ajoute de la fumée de silice condensée au mortier. Le coefficient de détermination, relativement bon, est de 0,75. La relation entre les deux essais concernant l'utilisation de laitier silicaté granulé est légèrement moins bonne, le coefficient de détermination calculé est de 0,69.

En résumé, nous pouvons affirmer qu'à la lumière de nos résultats, l'essai accéléré tel que proposé par Oberholster et Davies se comporte de façon "logique" face aux taux de remplacement des deux principaux additifs. Par contre, les limites de notre étude ne nous ont pas permis de cerner si l'effet des additifs est occasionné par la modification de la porosité du mortier, ou si c'est l'action pouzzolanique de ceux-ci qui entraînerait une diminution de la réactivité des granulats. Une observation de l'évolution des teneurs en Ca(OH)_2 pendant la cure accélérée serait intéressante. De cette façon, la deuxième hypothèse pourrait être vérifiée.

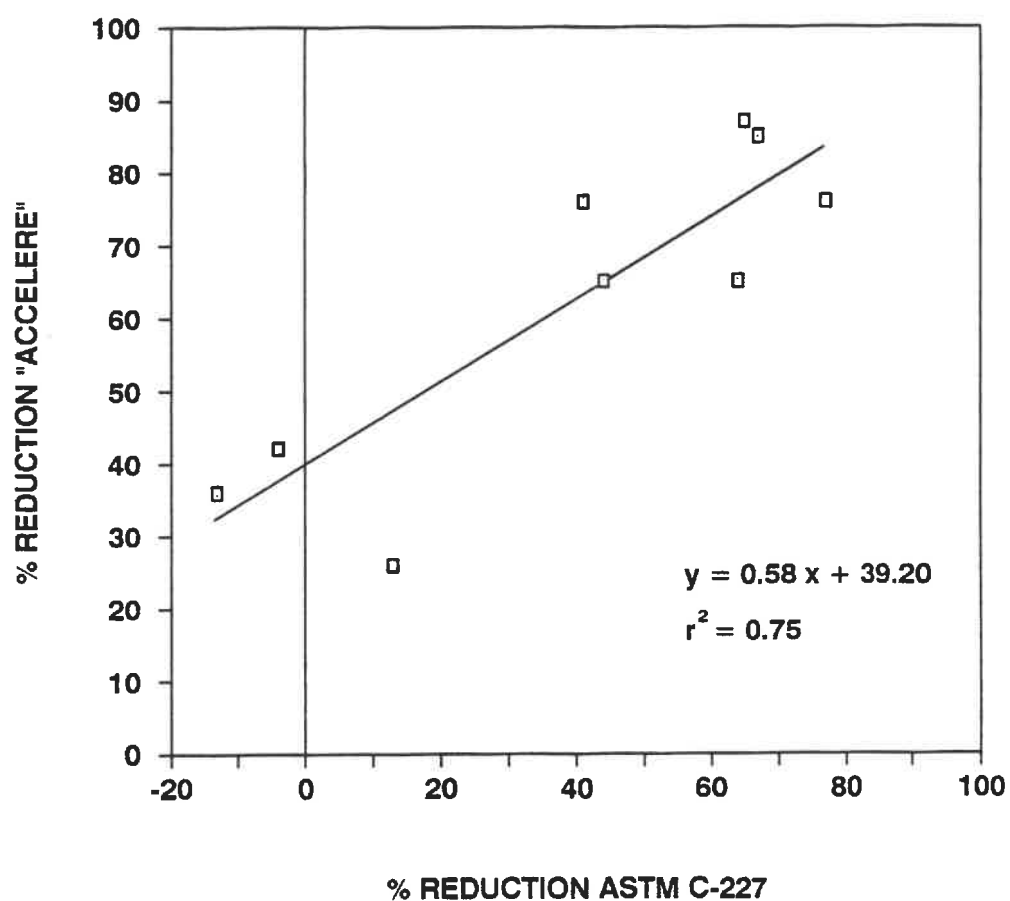
ESSAI ACCELERE / ESSAI ASTM C-227**REDUCTION OBTENUE AVEC ADDITIF FSC (%)**

Fig.104: Relation entre les réductions d'expansion de l'essai accéléré et de l'essai ASTM C227 avec l'utilisation de fumée de silice condensée comme additif aux termes de chaque essai.

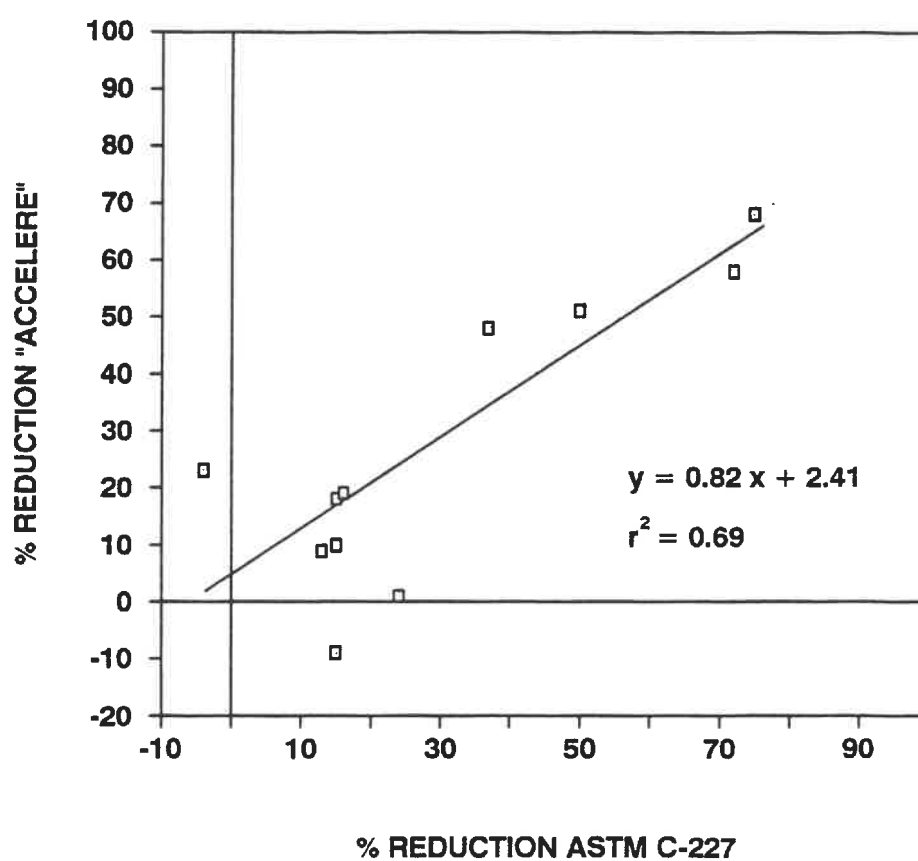
ESSAI ACCELERE / ESSAI ASTM C-227**REDUCTION OBTENUE AVEC ADDITIF LSG (%)**

Fig.105: Relation entre les réductions d'expansion de l'essai accéléré et de l'essai ASTM C227 avec l'utilisation de laitier silicaté granulé comme additif aux termes de chaque essai.

BIBLIOGRAPHIE

ABET, Y., 1985. "Recherche sur les causes des déformations de l'aménagement hydro-électrique de Beauharnois". Mémoire de maîtrise, Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 256 p.

AÏTCIN, P.C., 1988. "Les additifs minéraux du ciment Portland". Technologie avancée des bétons, 5^{ème} édition, Faculté des sciences appliquées de l'Université de Sherbrooke, Chap. 3, Québec. P.C. Aïtcin éditeur.

Association Canadienne de Normalisation (ACNOR), 1977, Rexdale, Ontario, Canada, pp.189-191.

- **A23.2-14A: Détermination de la réactivité alcalis-granulat (prismes de béton).**
- **A23.1-M77: Annexe B, Réaction alcalis-granulat.**

American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1982, Pa., U.S.A., Annual Book of ASTM Standards 04.02, Concrete and Mineral Aggregates, pp. 1-878.

- **ASTM C227: Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations, (Mortar Bar Method).**
- **ASTM C289: Potential Reactivity of Aggregates, (Chemical Method).**
- **ASTM C586: Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates, (Rocks Cylinder Method).**

BAKKER, R.F.M., 1981. "About the Cause of the Resistance of Blastfurnace Cement Concrete to the Alkali-Aggregate Reaction". Proc. 5th Int. Conf. on Alk.-Agg. Reaction in Concrete, S.A., Cape Town, Nat. Building institute of CSIR, S252/29, 5p.

- BERARD, J., 1980. "Influence de la nature minéralogique des aggrégats sur la qualité du béton". Technologie avancée du béton, 2ième édition, P.C. Aictin éditeur, Université de Sherbrooke, pp. 2.1 - 2.21.**
- BERARD, J., 1982. "Alkali-Silica Case Histories in Québec". C.S.A., A5 seminar, Cement-Aggregate Reactivity, Montréal, Québec.**
- BERARD, J., 1985. "Etude pétrographique de granulats réactifs au Québec". Atelier international sur les réactions alcalis-granulats dans le béton et la réhabilitation des parcs de stationnement étagés en béton, ACNOR, Montréal, Québec, pp. 332-344.**
- BERARD, J., et ROUX, R., 1986. "La viabilité des bétons au Québec: le rôle des granulats". Revue Canadienne de Génie Civil, Vol. 13, No. 1, pp. 12-24.**
- BERUBE, M.A. et FOURNIER, B., 1985. "Caractérisation des granulats calcaires exploités dans la région de Québec et évaluation de leur potentiel de réactivité alcaline". Rapport GGL 85-20, Département de Géologie, Université Laval, Québec, pp. 1-207.**
- BERUBE, M.A. et FOURNIER, B., 1986. "Les produits de la réaction alcalis-silice: étude de cas de la région de Québec". Canadian Mineralogist, Vol.24, pp. 271-288.**
- BERUBE, M.A. et FOURNIER, B., 1987. "Le barrage Sartigan dans la Beauce (Québec, Canada): un cas type de détérioration du béton par des réactions alcalis-granulats". Accepté pour publication dans la Revue Canadienne de Génie Civil.**
- BERUBE, M.A. et al., 1989. "Performance mécanique du béton atteint de réactivité alcaline". Présenté à Progrès dans le domaine du béton, ACI-section du Québec et de l'est de l'Ontario, Novembre 1989, Montréal, pp. 1-43.**
- BHATTY, M.S.Y., 1985. "Mechanism of Pouzzolanic Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion". Cem. Concr. Agg., ASTM, Vol. 7, No. 2, pp. 69-77.**

- BLANCHETTE, A., 1989. "Evaluation du potentiel de réactivité aux alcalis de granulats à béton par un essai accéléré". Mémoire de maîtrise en Sciences Appliquées, Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 201 p.
- BLANCHETTE, A., 1989a. "Evaluation du potentiel de réactivité alcaline des granulats à l'aide d'essais accélérés". Présenté à Progrès dans le domaine du béton, ACI-section du Québec et de l'est de l'Ontario, Novembre 1989, Montréal, pp. 1-18.
- CHATTERJI, S., 1978. "An Accelerated Method for the detection of Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 8, pp.647-650.
- CHATTERJI, S. et al., 1982. "Pozzolanic Activity of Byproduct Silica-Fume from Ferro-Silicon Production". Cement and Concrete Research, Vol. 12, pp. 781-784.
- CHATTERJI, S. et al., 1987. "Studies of Alkali-Silica Reaction. Part 4. Effect of Different Alkali Salt Solutions on Expansion". Cement and Concrete Research. Vol. 17, pp. 777-783.
- CHAURET, E., 1958. "Les réactions agrégat-ciment dans le béton". L'ingénieur, Vol. 44, No. 174, pp. 12-19.
- CLARK, T.H. et GLOBENSKY, Y., 1976. "Région des Laurentides (est)". R.G., Ministère des Richesses Naturelles du Québec, pp. 1-112 + cartes.
- COUSINEAU, P., 1984. "La Formation de Saint-Daniel et le Groupe de Magog entre St-George de Beauce et le Lac Etchemin". Rapport d'étape, Ministère de l'énergie et des Ressources du Québec.
- DAVIES, G. et OBERHOLSTER, R.E., 1987. "Use of the NBRI Accelerated Test to Evaluate the Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing the Alkali-Silica Reaction". Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp. 97-107.
- DELOYE, F-X., 1983. "Aspects pathologiques de l'interface pâte-granat". Bulletin de liaison, Laboratoire central des ponts et chaussées 126, réf. 2804, Paris, France, pp.37-44.

- DENT-GLASSER, L.S. et KATAOKA, N., 1981a. "The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction". Cement and Concrete Research, Vol. 11, pp.1-9.
- DENT-GLASSER, L.S. et KATAOKA, N., 1981b. "On the Role of Calcium in Alkali-Aggregate Reaction". Cement and Concrete Research, Vol 12, pp. 321-331.
- DIAMOND, S., 1975. "Pore Solutions and Alkali-Aggregate Attack". Proceedings of the 2nd International Conference on Alkali-Aggregate Reaction Preventive Measures, Reykjavik, Iceland, pp. 165-181.
- DIAMOND, S., 1975a. "A Review of Alkali-Silica Reaction and Expansion Mechanism, 1. Alkalies in Cements and in Concrete Pore Solution". Cement and Concrete Research, Vol. 5, pp. 329-346.
- DIAMOND, S., 1976. "Cement Paste Microstructure- An Overview at Several Levels". Dans Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties, Proc. of a Conf. held at University of Sheffield, April 8-9, 1976, Cem. and Conc. Ass., pp. 2-30.
- DIAMOND, S. and al., 1981. "On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reaction". Proceeding of the 5th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Cape town, South Africa, texte s252/22.
- DOLAR-MANTUANI, L., 1983. "Handbook of Concrete Aggregate- a Petrographic and Technical Evaluation". Noyes Publication, New-Jersey, 345 p.
- DOUBLE, D.D. et HELLAWELL, A., 1977. "The Solidification of Cement". Sc. Am., June, pp. 82-90.
- DURAND, B., 1985. "Le rôle des additifs minéraux dans les réactions alcalis-granulat". Mémoire de maîtrise en Sciences Appliquées, Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 199 p.
- DURAND, B., 1988. "Contrôle des réactions alcalis-granulats par l'utilisation d'ajouts minéraux". Thèse de Philosophie Doctor, Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 299 p.

- DURAND, B. et BERARD, J., 1987. "Use of Gel Composition as a Criterion for Diagnosis of Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete Containing Siliceous Limestone Aggregate". *Matériaux et Constructions*, Vol. 20, pp. 39-43.
- DURARD, M., 1969. "Etude des propriétés physiques et chimiques des calcaires de la région de Montréal". *Mémoire de maîtrise en Sciences Appliquées, Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique de Montréal*, 124 p.
- DURARD, M. et BERARD, J., 1974. "Réactivité des roches carbonatées aux alcalis du ciment". *Revue Canadienne de Géotechnique*, Vol.11, No. 2, pp. 248-256.
- FARBIARZ, J., CARRASQUILLO, R.L. and SNOW, P.C., 1987. "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Containing Fly Ash". *Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton*, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 55-59.
- GLASSER, F.P. and al., 1987. "Modification of Cement Pore Fluid Composition by Pozzolanic Additives". *Cement and Concrete Research*. Vol. 18, pp.165-178.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., 1981. "Canadian Experience of Alkali Expansivity in Concrete". *Proceedings of the 5th International Conference on alkali aggregate reaction in concrete*, Cape Town, South Africa, texte S252/6.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., 1982. "Preliminary Report on Potential Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregate from the Hebert Quarry, Sherbrooke, Québec". *National Research Council of Canada*, pp. 1-8.
- HOOTON, D., 1987. "Effect of Containers on ASTM C-441-Pyrex Mortar Bar Expansions". *Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton*, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 351-357.

- HOUDE, R., 1986.** "Etude des granulats à béton réactifs aux alcalis de la région de Trois-Rivières". Mémoire de maîtrise en Sciences Appliquées, Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 188 p.
- KNUDSEN, T., 1987.** "A Continuous Quick Chemical Method for the Characterization of the Alkali Silica Reactivity of Aggregates". Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 289-293.
- KRELL, J., 1987.** "Influence of Mix Design on Alkali-Silica Reaction in Concrete". Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp.441-445.
- LENZNER, D., 1981.** "Influence of the Amount of Mixing Water on the Alkali-Silica Reaction". Proceeding of the 5th International Conference on Alkali aggregate reaction in concrete, Cape Town, South Africa, texte S252/26.
- LE ROUX, A. et CADOR, C., 1984.** "Importance de la pétrographie dans l'approche des mécanismes de la réaction alcali-granulat". Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, No. 30, Paris, France, pp. 255-258.
- MALHOTTRA V.M., 1983.** " The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete". Mineral Processing Laboratory, CANMET, Project MRP 3.6.0.0.65, 11 p.
- McCOY, W.J. and CALDWELL, A.G., 1951.** "New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion". ACI Proceedings Vol. 47, pp. 693-708.
- METHA, P.K., 1983.** "Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete- A Critical Review". Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other By-Products in Concrete, Vol. 1, SP 79-1, 35 p.
- METHA, P.K., 1986.** "Concrete: Structure, Properties and Materials". Prentice-Hall International Series in Civil Engineering Mechanics, éd. Prentice-Hall Inc, Englewood cliffs, New Jersey 07632. 450 p.

- METHA P.K. et MANMOHAN, D., 1980. "Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes". 7ième Congrès International sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 7, pp. 1-5.
- MING-SHU, T. et SU-FEN, H., 1980a. "Effect of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on Alkali-silica Reaction". 7ième Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, France. Vol. 2, pp. 94-99.
- MING-SHU, T., YU-FENG, Y., MEI-GI, Y. et SHI-HUA, Z., 1980b. "The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-Silica Reaction and its mechanism". Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 2, pp. 171-176.
- MING-SHU, T., LIU, Z., and HAN, S., 1987. "Mechanism of Alkali-Carbonate Reaction". Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 275-279.
- NEVILLE, A.M., 1983. "Properties of Concrete". éd. Longman Scientific and Technical, England, 3ième édition, 780 p.
- NEWLON, H.H. Jr. et SHERWOOD, W.C., 1964. "Methods for Reducing Expansion of Concrete Caused by Alkali Carbonate Rock Reactions". Highway Research Record Bulletin, No. 45, pp. 134-150.
- NISHIBAYASHI, S., YAMURAK, K. et MATSUHITA, H., 1987. "A Rapid Method of Determining the Alkali Aggregate Reaction in Concrete by Autoclave". Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 299-303.
- OBERHOLSTER, R.E. et DAVIES, G., 1986. "An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp. 181-189.
- OBERHOLSTER, R.E. et DAVIES, G., 1986a. "Use on the NBRI Accelerated Test to Evaluate the Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing the Alkali-Silica Reaction". Cement and Concrete Research. Vol. 17, pp. 97-107.

- OLAFSSON, H., 1987. "The Effect of Relative Humidity and Temperature on Alkali Expansion of Mortar Bars". *Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton*, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 461-465.
- PER BREDSDRORFF, IDORN, G.M., KJAER, A., MUNKPLUM, N. AND POULSEN, E., 1960. "Chemical Reactions Involving Aggregate". *Chemistry of Cement. Proc. of 4th Int.Symp.* Washington, pp. 749-791.
- POWERS, T.C. AND STEINOUR, H.H., 1955. *Proc. American Concrete Institue*, #51, pp. 497, 785.
- PIGEON, M., 1986. "Composition et hydratation du ciment portland". *Technologie du béton*, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Sherbrooke, P.E. Aïtcin éditeur, chap. 1, pp 1.1-1.36.
- PINSONNEAULT, P. et AÏTCIN, P.E., 1983. "L'utilisation d'ajouts minéraux dans les bétons". *Présenté à Progress in concrete*, Novembre 1983, Ottawa, Canada, pp. 23-35.
- SCOTT, J.F. et DUGGAN, C.R., 1987. "Potential New Test for Alkali Aggregate Reactivity". *Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton*, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 319-323.
- SHAYAN, A., DIGGINS, R.G., IVANUSEC, I. et WESTGATE, P.L., 1988. "Accelerated Testing of Some Australian and Overseas Aggregates for Alkali Aggregate Reactivity". *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, pp. 843-851.
- SKALNY, J., and KLEMM, W.A., 1981. "Alkalis in Clinker: Origin, Chemistry, Effects". *Compte-rendus de la 5ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton*, Cape Town, South Africa, Nat. Building Institute of CSIR, S252/1.
- SMITH, R.L. and RABA, C.F., 1986. "Recent Developments in the Use of Fly Ash to Reduce Alkali-Aggregate Reaction". *Alkalies in Concrete*, ASTM STP 930, V.H. Dodson éditeur, Philadelphia, pp.58-68.

- SOLES, J.A., 1979. "Petrography in the Evaluation of Aggregates and Concrete". CANMET, Energy Mines and Ressources, Ottawa, Canada, Report 80-3E, pp. 1-44.
- STANTON, T.E. 1940. "The Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate". Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 66, pp. 1781-1811.
- ST-JULIEN, P. et LAMARCHE, R.Y., 1965. "Géologie de la région de Sherbrooke". R.P. 530, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, pp.1-36 + cartes.
- STARK, D.C., 1979. "Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations". Presented at the Symposium on Nonstandard Test Methods Useful in Determining Physical-Chemical Characteristics of Cement, San Diego, Cal. 1979, 4 p.
- STARK, K. et BHATTY, M.S.Y., 1985. "Alkali-Silica Reactivity: Effect of Alkali in Aggregate on Expansion". ASTM STP-930, Alkalies in Concrete, pp. 16-30.
- SWAMY, R.N. and Al-Asali, M.M., 1986. "Influence of Alkali-Silica Reaction on the Engineering Properties of Concrete". Alkalies in Concrete, ASTM STP 930, V.H. Dodson éditeur, Philadelphia, pp. 69-86.
- TAMURA, H., 1987. "A Test Method on Rapid Identification of Alkali Reactivity Aggregate, GBRC Rapid Method". Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 275-279.
- TENOUTASSE, N. and MARION, A.M., 1987. "Influence of Fly Ash in Alkali-Aggregate Reaction". Compte-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 44-48.
- THUTHILL, L.H., 1978. "Mineral Admixtures". STP ASTM No. 169B, Chap. 46, pp. 805-822.

VAN AARDT, J.H.P. et VISSER, S., 1982. "Progress Report, Part 2". CSIR Research Report BRR 577, Pretoria, South-Africa.

VIVIAN, H.E., 1951. Aust. J. Appl. Sci. Vol.2.

XU HUAYONG, 1987. "On the Alkali Content of Cement in AAR". Comptes-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 451-455.

YOSHIOKA, Y., and al., 1987. "Study on a Rapid Test Method for Evaluating the Reactivity of Aggregates". Comptes-rendus de la 7ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 314-318.

ANNEXE A

A.1 CARACTERISTIQUES DU MELANGE DE MORTIER UTILISE LORS DES ESSAIS

CIMENT : Lafarge type 10 (0.9% Na_2O éq.)
 ADDITIFS CHIMIQUES: NaOH et
 Sulfonate de Naphtalène
 EAU : Distillée

DOSAGE (POUR DEUX BARRES):

CIMENT.....	300.00	gr
NaOH.....	1.35	gr
EAU.....	135	ml
SUPERPLASTIFIANT "WRDA 19".....	1.4	ml
GRANULAT		
Tamis 8 (4.75mm).....	67.50	gr
" 16 (2.36mm).....	168.75	gr
" 30 (1.18mm).....	168.75	gr
" 50 (600µm).....	168.75	gr
" 100 (300µm).....	101.25	gr

RAPPORT EAU / CIMENT..... 0.45

RAPPORT CIMENT / GRANULAT..... 0.44

La teneur en Na_2O éq. du ciment est augmentée à une teneur de 1.25% par addition de NaOH à l'eau de gâchage.

Les procédures de la norme ASTM C305 sont suivies lors du mélange.

A.2 CARACTERISTIQUES DES CONTENANTS UTILISES POUR LA CURE ACCELEREE

Compagnie.....RUBBERMAID

Type....."Table-O-Frigo"

Forme.....Rectangulaire

Volume.....8.2 litres

Dimensions.....25 cm X 38 cm X 13 cm

Matériel.....Polypropylène

Fabrication....Canadienne, Ontario

**A.3 CARACTERISTIQUES DU CIMENT
ET DES AJOUTS MINERAUX**

	CIMENT	FUMEE DE SILICE	LAITIER SILICATE GRANULE
CaO	61.29	0.43	46.10
SiO ₂	21.83	91.85	45.91
Al ₂ O ₃	4.10	0.49	2.41
Fe ₂ O ₃	2.89	1.35	1.23
MgO	2.66	0.49	1.34
Na ₂ O	0.36	0.14	0.17
K ₂ O	0.85	0.76	0.83
SO ₃	3.24	1.35	0.18
TiO ₂	0.20	0.009	0.06
P ₂ O ₅	0.21	0.005	1.06
MnO	0.05	0.05	0.027
P. au feu	2.22	3.72	0.00
TOTAL	99.69	99.31	99.31
ALCALIS TOTAUX	0.92	0.64	0.71
SOLUBLES*	0.52	0.25	0.004
DISPONIBLES**	0.44	0.08	0.29
SURFACE SPEC BLAINE (m ² /Kg)	404	20 000	315
DENSITE	3.13	2.20	2.93
* Norme ASTM C114	** Norme ASTM C311		

ANNEXE B

B.1.1 RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR BARRES DE MORTIER GRANULAT OTTAWA

AGE (JRS)	GRANULAT OTTAWA EXPANSIONS (%)					
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	5LSG	10LSG
2	0.030	0.006	0.008	0.000	0.090	0.082
5	0.206	0.069	0.016	0.011	0.154	0.157
7	0.251	0.116	0.049	0.034	0.251	0.225
9	0.301	0.144	0.090	0.050	0.275	0.260
12	0.348	0.202	0.122	0.082	0.344	0.315
14	0.369	0.228	0.151	0.105	0.371	0.339

FSC : Fumée de silice condensée

LSG : Laitier silicaté granulé

**B.1.2 RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR BARRES DE
MORTIER GRANULAT OTTAWA (SUITE)**

AGE (JRS)	GRANULAT OTTAWA (SUITE) EXPANSIONS (%)					
	15LSG	50LSG	70LSG	0,5LiCO	1,0LiCO	1,5LiCO
2	0.020	0.009	0.011	0.022	0.042	0.040
5	0.125	0.062	0.035	0.170	0.143	0.188
7	0.211	0.090	0.060	0.232	0.215	0.273
9	0.220	0.121	0.087	0.270	0.310	0.350
12	0.271	0.146	0.110	0.370	0.399	0.445
14	0.294	0.163	0.123	0.392	0.447	0.496

FSC : Fumée de silice condensée
 LSG : Laitier silicaté granulé
 LiCO : Carbonate de lithium

B.2.1 RESULTATS DES ESSAIS ASTM C227 GRANULAT OTTAWA

AGE (JRS)	GRANULAT OTTAWA EXPANSIONS (%)					
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	5LSG	10LSG
14	0.013	0.007	0.003	0.000	0.009	0.008
30	0.025	0.013	0.009	0.003	0.023	0.021
60	0.042	0.023	0.011	0.008	0.030	0.029
90	0.054	0.030	0.008	0.007	0.060	0.060
120	0.076	0.057	0.021	0.018	0.064	0.068
180	0.095	0.099	0.034	0.022	0.072	0.081

FSC : Fumée de silice condensée

LSG : Laitier silicaté granulé

**B.2.2 RESULTATS DES ESSAIS ASTM C227 GRANULAT OTTAWA
(SUITE)**

AGE (JRS)	GRANULAT OTTAWA (SUITE) EXPANSIONS (%)					
	15LSG	50LSG	70LSG	0,5LiCO	1,0LiCO	1,5LiCO
14	0.013	0.013	0.011	0.017	0.018	0.019
30	0.016	0.011	0.013	0.025	0.023	0.023
60	0.042	0.016	0.020	0.030	0.024	0.030
90	0.055	0.022	0.019	0.036	0.028	0.031
120	0.077	0.030	0.024	0.053	0.040	0.041
180	0.080	0.027	0.024	0.060	0.045	0.046

FSC : Fumée de silice condensée
 LSG : Laitier silicaté granulé
 LiCO : Carbonate de lithium

**B.3.1 RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR BARRES DE
MORTIER GRANULAT BEAUCEVILLE**

AGE (JRS)	GRANULAT BEAUCEVILLE EXPANSIONS (%)						
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	10LSG	15LSG	50LSG
2	0.010	0.009	0.000	0.000	0.020	0.020	0.022
5	0.017	0.070	0.012	0.012	0.147	0.151	0.100
7	0.023	0.110	0.034	0.016	0.188	0.182	0.118
9	0.270	0.150	0.066	0.028	0.215	0.205	0.140
12	0.330	0.210	0.115	0.050	0.270	0.253	0.163
14	0.360	0.230	0.142	0.080	0.293	0.268	0.173

FSC : Fumée de silice condensée

LSG : Laitier silicaté granulé

B.3.2 RESULTATS DES ESSAIS ASTM C227 GRANULAT
BEAUCEVILLE

AGE (JRS)	GRANULAT BEAUCEVILLE EXPANSIONS (%)						
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	10LSG	15LSG	50LSG
14	0.007	0.000	-0.002	-0.007	0.009	0.009	0.008
30	0.012	0.005	0.000	-0.005	0.015	0.015	0.011
60	0.021	0.014	0.006	0.001	0.010	0.018	0.016
90	0.032	0.022	0.009	0.005	0.030	0.033	0.020
120	0.041	0.029	0.012	0.006	0.033	0.038	0.020
180	0.048	0.054	0.027	0.016	0.041	0.050	0.024

FSC : Fumée de silice condensée
 LSG : Laitier silicaté granulé

B.4.1 RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR BARRES DE MORTIER
GRANULAT SHERBROOKE

AGE (JRS)	GRANULAT SHERBROOKE EXPANSIONS (%)						
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	10LSG	15LSG	50LSG
2	0.009	0.000	0.000	0.002	0.009	0.010	0.016
5	0.061	0.028	0.000	0.006	0.065	0.052	0.039
7	0.088	0.058	0.013	0.011	0.098	0.080	0.053
9	0.110	0.065	0.020	0.016	0.128	0.106	0.066
12	0.151	0.112	0.036	0.019	0.165	0.138	0.079
14	0.170	0.137	0.059	0.026	0.182	0.152	0.084

FSC : Fumée de silice condensée

LSG : Laitier silicaté granulé

B.4.2 RESULTATS DES ESSAIS ASTM C227 GRANULAT SHERBROOKE

AGE (JRS)	GRANULAT SHERBROOKE EXPANSIONS (%)						
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	10LSG	15LSG	50LSG
14	0.013	0.000	-0.005	-0.008	0.013	0.012	0.014
30	0.017	0.007	0.002	0.002	0.010	0.015	0.017
60	0.027	0.017	0.008	0.005	0.024	0.024	0.024
90	0.018	0.026	0.012	0.007	0.026	0.025	0.022
120	0.035	0.028	0.021	0.015	0.034	0.034	0.026
180	0.046	0.040	0.027	0.016	0.039	0.040	0.029

FSC : Fumée de silice condensée

LSG : Laitier silicaté granulé

B.5.1 RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR BARRES DE MORTIER
GRANULAT VALLEYFIELD

AGE (JRS)	GRANULAT VALLEYFIELD EXPANSIONS (%)						
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	10LSG	15LSG	50LSG
2	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.003	0.011
5	0.015	0.012	0.003	0.004	0.021	0.021	0.018
7	0.027	0.019	0.007	0.010	0.023	0.027	0.022
9	0.033	0.022	0.012	0.013	0.030	0.030	0.030
12	0.040	0.030	0.020	0.015	0.034	0.040	0.035
14	0.049	0.035	0.030	0.030	0.022	0.045	0.040

FSC : Fumée de silice condensée

LSG : Laitier silicaté granulé

B.5.2 RESULTATS DES ESSAIS ASTM C227 GRANULAT VALLEYFIELD

AGE (JRS)	GRANULAT VALLEYFIELD EXPANSIONS (%)						
	CTL	5FSC	10FSC	15FSC	10LSG	15LSG	50LSG
14	0.012	0.010	0.004	0.000	0.005	0.005	0.003
30	0.021	0.011	0.008	0.000	0.011	0.011	0.008
60	0.018	0.014	0.011	0.014	0.015	0.014	0.011
90	0.018	0.013	0.016	0.013	0.020	0.019	0.017
120	0.027	0.021	0.021	0.020	0.025	0.024	0.020
180	0.031	0.026	0.028	0.019	0.024	0.022	0.018

FSC : Fumée de silice condensée
 LSG : Laitier silicaté granulé

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00290782 0